

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Paperitekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö

Saija Pöllänen

**MONIKERROSKARTONGIN VIIRAOSAN LIITOSKOSTEUKSIEN HALLINTA JA
MITTAAMINEN**

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2008

TkL Päivi Viitaharju
Stora Enso Oyj, ohjaaja käyttöinsinööri Tomi Kulomaa

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Paperitekniikan koulutusohjelma

Saija Pöllänen	Monikerroskartongin viiraosan liitossakeuksien hallinta ja mittaaminen
Opinnäytetyö	71 sivua+14 liitesivua
Työn ohjaaja	TkL Päivi Viitaharju
Työn teettäjä	Stora Enso Oyj, ohjaaja käyttöinsinööri Tomi Kulomaa
Toukokuu 2008	
Hakusanat	monikerroskartonki, palstautuminen, liitossakeus, sakeusmittaus

TIIVISTELMÄ

Monikerroskartongin ominaisuuksista kerrosten välinen palstautumislujuus on jatkojalostuksen ja tuotteen loppukäytön kannalta yksi kriittisimmistä. Kerrosten välisen liitoksen on kestävä jatkojalostuksen ja painatuksen aiheuttamat rasitukset, mutta kuitenkin kartongin on nuutattaessa palstauduttava mahdollisimman moneen kerrokseen.

Tämän työn kirjallisuusosassa on selvitetty kartongin palstautumista aiheuttavia rasituksia sekä keinoja, joilla kerrosten väliseen palstautumiseen voidaan vaikuttaa. Kokeellisessa osassa on sen sijaan keskitytty selvittämään, millainen vaikutus kartongin eri kerrosten liitossakeuksilla on kerrosten väliseen palstautumiseen.

Liitossakeuksia tutkittiin ajamalla koeajo, jossa sakeuksia muutettiin vedenpoistoelimien alipaineita ja perälaatikkojen huuliaukkoja muuttamalla. Sakeusmittauksen suoritti kudostoimittajan edustaja käsimitoituksena. Koepisteistä otetuista näytteistä suoritettiin määritykset z-suuntaisella vetolujuustestillä, Scott Bond -testillä sekä IGT-palstautumislujuusmenetelmällä kummallekin kerrosten väliselle rajapinnalle erikseen. Z-lujuus- ja Scott Bond -määrityksiä varten kartongista revittiin irti sen puolen pintakerros, joka ei ollut tarkasteltavana. Näistä mittauksista tehtiin myös kartongin halkeamakohdasta silmämääräinen arvio. Saatuja tuloksia tutkittiin 95 % luottamustason t-testillä pisteiden välillä olleiden erojen selvittämiseksi.

Saadut tulokset osoittavat, että luotettavien tulosten saaminen liitossakeuden vaikutuksesta on hankalaa ja vaatii paljon rinnakkaisia mittauksia suuren hajonnan vuoksi. Pinta- ja runkokerroksen välinen sitoutuminen osoittautui kuitenkin tässä työssä tehdyn koeajon pisteistä parhaimmaksi niissä, joissa kerrosten sakeudet olivat tietyssä suhteessa toisiinsa. Yleisemmin tarkasteltaessa matalimmalla rungon sakeudella näytettäisiin kuitenkin saatavan tasaisimmin parhaita tuloksia pinnan sakeuden muuttuessa.

Myös tausta- ja runkokerrosten välisissä palstautumismäärityksissä tasaisen hyviä arvoja antoivat pisteet, joilla kerrosten sakeuksilla oli tietyn suuruinen suhde. Alhaisella rungon sakeudella näyttäisi myös taustakerroksen sakeus olevan kerrosten välisen sitoutumisen kannalta kriittisempi tekijä kuin hieman korkeammilla rungon sakeuksilla. Molemmat rajapinnat huomioiden, parhaat tulokset saatiin pisteessä, jossa kaikkien kerrosten sakeudet olivat alimmillaan.

Jatkossa tutkittaessa liitossakeuksien merkitystä kerrosten väliselle sitoutumiselle olisi näytteistä tehtävien rinnakkaismääritysten määrää lisättävä ja mahdollisesti suorittaa näytteistä myös hienoainejakaumatutkimukset tuloksien luotettavuuden parantamiseksi.

TAMPERE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Paper Technology

Saija Pöllänen

Control and Measuring of Combining Moistures of Wire Section of Multiply Board

Final thesis

71 pages, 14 appendix pages

Thesis supervisor

Päivi Viitaharju (Lich.Tech.)

Commissioning company

Stora Enso Oyj. Supervisor: Tomi Kulomaa (superintendent)

May 2008

Keywords

multiply board, delamination, combining consistency, consistency measurement

ABSTRACT

When considering board converting processes and end use applications, one of the most critical features of multiply board is its out-of-plane strength between different plies. A bond between two plies should hold when converting and printing but board should be also delaminated while creasing.

The aim of the literature section of this thesis has been to examine the stresses which cause the delamination of board and also the ways to affect it. In the experimental part of this work, the focus is in combining consistencies of different plies and how changes made in those are affecting the ply bond strength.

In order to examine influence of consistency while joining two plies together, the trial run was carried out. During that run, all changes were made with vacuums of dewatering elements and slice openings of headboxes. Consistency measurement was done with hand-operated measuring device by representative of a fabric supplier. From samples that were taken during the test run, following measurements were done separately to the both interfaces between plies: Z-directional tensile strength test, Scott Bond -test and IGT-delamination speed test. For z-strength and Scott Bond -test, the ply that wasn't under inquiry was taken off. From these measurements, the break point was also estimated visually. Values received from these tests were also calculated statistically with the t-test at 95 % confidence level.

Outcomes from these measurements show that reliable results are hard to get and several parallel measurements should be done because of large deviation. Adhesion between top and middle layers in this test run turned out to be best in those trial points where consistencies of layers were in certain ratio with each other. As a whole, the lowest used consistency in middle ply seems to give most evenly good results while consistency of the top layer changes.

Also, when considering out-of-plane strength measurements between back and middle plies, most evenly best results were got from trial points where there was certain ratio between consistencies of plies. It also seems to be that when using the lowest consistency of this trial in middle ply, the consistency of back ply is more critical than when operating with higher middle ply consistencies.

In future, when examining the meaning of combining consistencies to ply bond strengths, it would be recommended to increase the amount of parallel measurements and also investigate how fines are distributed in different trial points if possible. In these ways, the results would be more reliable.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO	4
1 JOHDANTO	6
2 MONIKERROSKARTONGIT YLEISESTI.....	7
2.1 Kartonkilajit.....	7
2.2 Massat.....	9
2.3 Kriittiset ominaisuudet	10
2.3.1 Mekaaniset ja toiminnalliset ominaisuudet	12
2.3.2 Visuaaliset ominaisuudet.....	13
2.3.3 Muut ominaisuudet	14
2.4 Monikerroskartonkikone	15
2.4.1 Rainanmuodostusosa	15
2.4.2 Tasoviiran vedenpoiston teoria.....	16
3 MONIKERROSKARTONGIN PALSTAUTUMINEN.....	21
3.1 Palstautumislujuuden mittaaminen.....	22
3.2 Palstautumista aiheuttavat rasitukset.....	25
3.3 Kerrosten väliseen palstautumiseen vaikuttaminen.....	27
3.3.1 Rainan rakenne	28
3.3.2 Kuidun ominaisuudet.....	29
3.3.3 Viiraosan z-suuntaiset jakaumat	29
3.3.4 Jauhatus	31
3.3.5 Kerrosten kosteudet liitettäessä	34
3.3.6 Muut keinot	34
4 KERROSTEN LIITOSKOSTEUTEEN VAIKUTTAMINEN	36
4.1 Tasoviiran vedenpoistoelimet.....	36
4.2 Perälaatikkosakeus	39
5 SAKEUDEN ON-LINE MITTAAMINEN VIIRAOSALLA.....	40

6 KOKEELLISEN OSAN TAVOITE.....	42
7 TYÖN SUORITUS	42
7.1 Työssä käytetyt palstautumislujuuden mittausmenetelmät	43
7.2 Liitossakeuskoeajo	44
8 LIITOSSAKEUSKOEAJON TULOKSET	47
8.1 Pinnan ja rungon välinen palstautuminen.....	47
8.1.1 Z-suuntainen vetolujuus ja Scott Bond.....	47
8.1.2 IGT-palstautumisnopeus.....	54
8.2 Rungon ja taustan välinen palstautuminen	57
8.2.1 Z-suuntainen vetolujuus ja Scott Bond.....	57
8.2.2 IGT-palstautumisnopeus.....	62
9 TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI.....	64
10 TULOSTEN YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	65
10.1 Yhteenveto suoritetusta koeajosta	65
10.2 Ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi	66
LÄHDELUETTELO	69

LIITTEET

- 1 Z-suuntaisten vetolujuusmittausten erot
- 2 T-testien tulokset z-suuntaisista vetolujuusmittauksista
- 3 Scott Bond -mittausten erot
- 4 T-testien tulokset Scott Bond -mittauksista
- 5 IGT-palstautumisnopeusmittausten erot painatusnopeudella 6 m/s
- 6 Näyte Scott Bond -halkeamasta
- 7 Näyte IGT-palstautumisnopeusmääritysten liuskoista

1 JOHDANTO

Monikerroskartonkeja valmistetaan useammalla erilaisella rakenteella, mutta kaikkien näiden käyttökohteet ovat pääasiassa pakkausteollisuudessa sekä graafisissa tuotteissa. Kartongeilla on käyttökohteen mukaisesti monia vaadittavia ominaisuuksia, mutta kaikille yhteisinä vaatimuksina voidaan kuitenkin mainita riittävät jäykkyys-, lujuus- ja sileysominaisuudet. Valmistettaessa kartonkia useammasta erillisestä kerroksesta nousee kerrosten välinen sitoutuminen yhdeksi tärkeimmistä vaatimuksista, sillä kartongin on kestävä jatkjalostuksen ja loppukäytön aiheuttamat rasitukset.

Tämän opinnäytetyön kirjallisuusosassa on keskitytty monikerroskartongin palstautumiseen niin erillisten kerrosten sisältä kuin kerrosten väliltäkin, palstautumista aiheuttaviin rasituksiin sekä keinoihin, joilla siihen voidaan vaikuttaa. Työssä keskitytään lähinnä ratkaisuun, jossa kerrokset valmistetaan erillisillä tasoviirayksiköillään ennen niiden kerrostamista taustaviiran päälle, sillä tämä on monikerroskartongin valmistuksen yleisin ratkaisu. Tämän vuoksi myös tasoviiran vedenpoiston teoriaan sekä vedenpoistoelimien toimintaan on tutustuttu hieman tarkemmin.

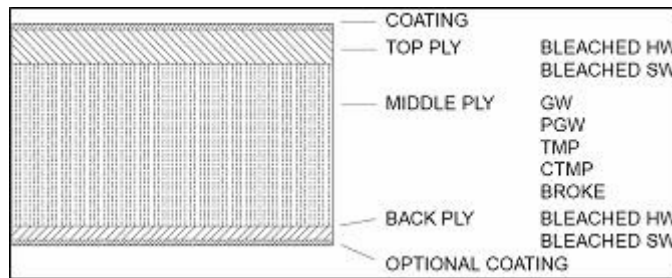
Työn kokeellisessa osassa on puolestaan tutkittu kerrosten liitossakeuksien merkitystä niiden väliseen palstautumiseen kartongilla, jonka kaikki kerrokset eivät ole valmistettu kemiallisesta massasta ja siten kerrosten sitoutumiskyky on heikompi.

2 MONIKERROSKARTONGIT YLEISESTI

Monikerroskartongit ovat sisäpakkauskartonkeja, ja niihin luokitellaan yleisesti kaikki enemmän kuin yhden kerroksen sisältävät kartongit. Yleisin kerrosmäärä näille kartongeille on kolme, mutta myös viidestä eri kerroksesta valmistettavia kartonkeja on markkinoilla. Monikerroksisen rakenteen valmistamiseen on siirrytty lähinnä kahdesta syystä. Ensiksikin vedenpoistovastus kasvaa eksponentiaalisesti neliömassan kasvaessa, mikä aiheuttaa suuria ongelmia korkean neliömassan tuotteita valmistettaessa. Toiseksi erilaisten raaka-aineiden käyttö taloudellisesti vaatii, että eri kuiduista valmistettavat kerrokset tulee voida asettaa halutulla tavalla. Monet kartongit ovat myös päällystettyjä parhaan painatuksen saavuttamiseksi. /4; 22/

2.1 Kartonkilajit

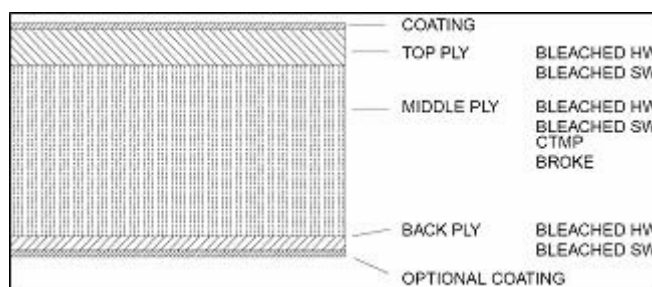
Monikerroskartongit jaetaan yleisesti neljään lajiin: taivekartonki, valkaistua sellukartonki, valkaisuamaton sellukartonki sekä valkopintainen kierrätyskartonki. Taivekartonki on monikerroskartonki, jonka keskikerroksessa käytetään mekaanista tai kemimekaanista (CTMP) massaa sekä omaa hylkyä ja pintakerroksissa lyhyt- sekä pitkäkuitusellua, kuten kuvasta 1 nähdään. Yleisin kerroslukumäärä on kolme ja yhdistettyjen kerrosten neliöpaino vaihtelee 200–500 g/m². Keskikerros voidaan valmistaa joko valkaistuna tai valkaisuamattomana, mutta pintoihin käytettävä kemiallinen massa on yleisesti aina valkaistua. Kartonki voi olla myös pintaliimattu sekä käyttökohteesta riippuen kokonaan päällystämätön, pinnasta kertaalleen päällystetty tai pinta kahteen kertaan ja tausta kerran päällystetty. Käyttökohteita tälle lajille ovat ruoka-, tupakka-, kosmetiikka-, lääke-, makeis- sekä hygieniatuotepakkaukset. Taivekartonki on eniten käytetty sisäpakkauskartonki. Edempänä tässä työssä keskitytäänkin nimenomaan mekaanista tai kemimekaanista massaa sisältävän tuotteen ominaisuuksiin. /4; 11; 9, s. 15/



Kuva 1 Taivekartongin rakenne /11/

Valkaistu ja valkaisuamaton sellukartonki valmistetaan nimensä mukaisesti ainoastaan kemiallisesta massasta. Solid bleached sulphateboard (SBS) eli valkaistu sellukartonki on Pohjoismaissa tyypillisesti monikerrostuote (kuva 2), kun se muualla maailmassa valmistetaan yksikerroksisena. Tuotteen käyttökohteet ovat osaltaan samankaltaisia kuin taivekartongilla, mutta raaka-ainerakenteensa johdosta tuotetta käytetään hieman korkeampilaatuisten tuotteiden pakkaamiseen. Lisäksi SBS-kartonkia käytetään myös nestepakkauksiin ja juomakuppeihin sekä graafisiin tuotteisiin, kuten postikortteihin. Nestepakkauksiin ja juomakuppeihin käytettävän kartongin keskikerros on usein valmistettu osittain CTMP-massasta ja tuote on voimakkaasti märkäliimattu. /4; 9, s. 15; 3, s. 73/

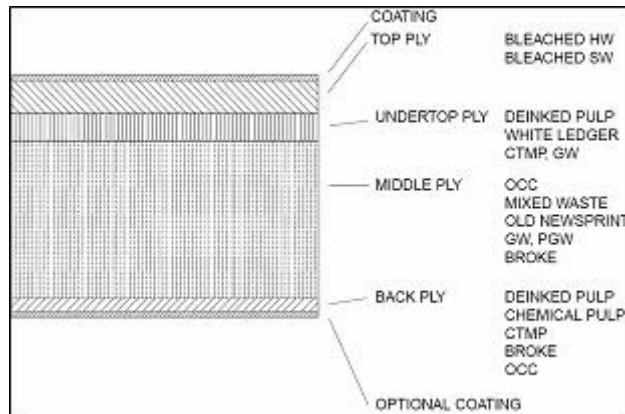
Solid Unbleached Sulphateboard (SUS) on puolestaan valkaisuamattomasta kemiallisesta massasta tehty kartonki, jota käytetään kohteissa, joissa ulkonäkövaatimukset ovat pienemmät (esimerkiksi olutpakkaukset). /4/



Kuva 2 Kolmikerroksisen valkaistun sellukartongin rakenne /11/

Valkopintainen kierrätyskartonki eli White lined chipboard (WLC) on kierrätetyistä kuituista valmistettu monikerroksellinen tuote, jonka kerroksissa käytetään eritasoisia kierrätettyjä kuituja (kuva 3). Neliöpainot vaihtelevat tyypillisesti 200 ja 600 g/m²:n välillä. Tyypillisesti pinnat valmistetaan valkaistusta sellusta tai korkeavaaleuksisesta kierrätetystä toimistopaperista (MOW) ja

keskikerros sekajätteestä (MW). Tuotetta käytetään elintarvikepakkaamisen saralla pääasiassa vain sekundäärisiin käyttökohteisiin. Sen suuremmat käyttökohteet ovatkin muiden kulutushyödykkeiden pakkaamisessa. /4; 9, s. 15/



Kuva 3 Kierrätyskartongin rakenne /11/

2.2 Massat

Yleinen tavoite kartongin valmistuksessa on tuottaa rakenne, jossa keskikerroksilla on matala ja pintakerroksilla korkea tiheys. Monikerroskartongeilla tämä on toteutettu optimoimalla eri kerroksiin käytettävät massakoostumukset. Pintakerroksissa käytetään lähes poikkeuksetta kemiallista massaa, jonka tarkoituksena on taata tuotteelle riittävät lujuusominaisuudet ja yhdessä päällystekerroksen kanssa vaadittavat pintaominaisuudet, kuten vaaleus ja sileys. Mekaanisen massan (painehieke, hierre) tai CTMP:n käytöllä keskikerroksessa pyritään puolestaan optimoimaan tuotteen bulkkiset ominaisuudet. Samasta syystä pintojen osuus lopullisen tuotteen neliöpainosta pyritään pitämään niin alhaalla, kuin se vain taivutusjäykkyyden ja painatusominaisuuksien kannalta on mahdollista. /2, s. 322; 6/

Hiokemassa (PGW) on edelleen eniten käytetty massa kartongin keskikerroksessa. Kuumahierteen (TMP) käyttö kartongeille ei puolestaan ole yhtä yleistä sen hioketta pienemmän hienoainepitoisuuden ja siten huonompien sitoutumisominaisuuksien vuoksi. CTMP on puolestaan laajalti käytössä, ja koneen oman hylkymassan käyttö tietyissä määrin on tavallista sen kemiallisten kuitujen aiheuttaman lujuustason nousun vuoksi. /5/

CTMP-massaa valmistetaan kuusihakkeesta mekaanisella prosessilla, johon on lisätty kemikaalikäsittely. Tämä kemikaalikäsittely heikentää kuitujen välisiä sidoksia ennen niiden mekaanista erottamista, joten käsittely ei ole niin raju kuin tavallisessa hiertoprosessissa. Verrattuna TMP:hen CTMP-massa sisältää vähemmän tikkuja, enemmän pitkiä kuituja ja vähemmän hienoainetta. Samalla Freeness-tasolla tarkasteltuna CTMP:llä on puhtaasti mekaanisia massoja heikommät bulkkiominaisuudet, mutta tätä voidaan kuitenkin kompensoida valmistamalla massa korkeampaan Freeness-tasoon. Tarvittaessa massa valkaistaan ennen käyttöä joko peroksidi- tai ditioniittikäsittelyllä. /1; 18/

2.3 Kriittiset ominaisuudet

Kaikille kartongeille yhteisenä vaatimuksena on korkea taivutusjäykkyys sekä hyvä yleinen lujustaso. Myös visuaaliset ominaisuudet ovat kriittisiä, varsinkin, jos tuote on tarkoitettu korkeampilaatuisten kulutushyödykkeiden pakkaamiseen. Elintarvikepakkauksien vaatimuksista tuotteen puhtaus sekä läpäisemättömyysominaisuudet ovat myös merkitseviä. Taulukkoon 1 on koottu sisäpakkaukskartongeilta vaadittavia ominaisuuksia sekä näitä kuvaavia, mitattavissa olevia suureita.

Taulukko 1 Monikerroskartongin tuoteanalyysi

OMINAISUUDET	MITATTAVISSA OLEVAT
<p><u>PROSESSOITAVUUS</u> <u>KARTONKIKONEELLA</u></p> <p>Vetokestävyys märkänä</p> <p>pintakerrokset eivät saa olla liian tiiviitä, jotta vesihöyry pääsee poistumaan paksusta keskikerroksesta</p> <p>hyvä rullattavuus ja pituusleikattavuus</p>	<p>vetolujuus, venymä, murtotyö, kuiva-ainepitoisuus, neliömassa</p> <p>pintakerrosten huokoisuus</p> <p>tasaiset neliömassa- ja kosteusprofiilit</p>
<p><u>AJETTAVUUS JALOSTUSLINJOILLA</u></p> <p>hyvä yleinen lujuustaso</p> <p>hyvät nuuttausominaisuudet</p> <p>kartonkia päällystettäessä, joko pigmenttipäällystyksellä tai ekstruusiopäällystyksessä, tulee pohjakartongin pinnan olla riittävän tasainen. Pintakerroksilla ei pystytä kompensoimaan keskikerroksen liian epätasaista pintaa. Kartonkia painetaan myös syväpainossa, jolloin sileysvaatimukset ovat korkeat</p> <p>kartonki ei saa haljeta liian helposti</p> <p>kartonki ei saa olla liian käyrää</p> <p>kartonki ei saa olla liian kitkaista</p>	<p>vetolujuus, puhkaisulujuus, repäisylujuus, palstautumislujuus, pinalujuus</p> <p>murtositkeys, taivutusjäykkyys, venymä, vetolujuus sekä z-suuntainen kokoonpuristuvuus ja lujuus. Myös kosteus vaikuttaa</p> <p>karheus, formaatio</p> <p>z-suuntainen lujuus (Scott Bond), kerrosten välinen sitoutuneisuus (ply bond)</p> <p>kosteusprofiili, anisotropisuus</p> <p>kitka, sähköisyys</p>
<p><u>PUHTAUS</u></p> <p>kartonki ei saa sisältää mikrobeja tai itiöitä mikäli se on suorassa kontaktissa herkkään elintarvikkeeseen</p> <p>tuotteesta ei saa siirtyä hajuja, makuja tai väriä</p>	<p>mikrobimääritykset</p> <p>maku ja haju testaukset (koeryhmän avulla)</p>
<p><u>KÄYTETTÄVYYS</u></p> <p>pakkauksen tulee suojata tuotetta</p> <p>helppo pakkauksen avautuvuus</p> <p>nestepakkauksia tai juomakuppeja valmistettaessa ei nestettä saa tunkeutua pakkaukseen saumoista</p> <p>tuotteen tulee pitää muotonsa</p>	<p>puhkaisulujuus, hydrofobisuus, puristuslujuus, taivutusjäykkyys</p> <p>kerrosten välinen sitoutuneisuus, palstautumislujuus</p> <p>raakareunaimetyymä (REP)</p> <p>jäykkyys, bulkki, venymä</p>

2.3.1 Mekaaniset ja toiminnalliset ominaisuudet

Pakkauskartongeilla korkea taivutusjäykkyys on välttämätön hyvän ajettavuuden vuoksi pakkauslinjastoilla ja hyvän pakkauksen aikaansaamiseksi. Ongelmat taivutusjäykkyyden riittämättömyydessä ilmenevät yleensä, kun neliöpainoa pyritään laskemaan raaka-ainesäästöjen toivossa ja monikerroskartongin yhtenä tarkoituksena onkin pyrkiä saavuttamaan riittävä jäykkyys alhaisemmalla neliömassalla. Poikkisuuntainen jäykkyys on yleensä noin 2–4 kertaa huonompi kuin konesuunnan jäykkyys ja siksi kriittisempää. Hyvällä konesuuntaisella jäykkyydellä ei myöskään pystytä kompensoimaan huonoa poikkisuuntaista jäykkyyttä, joten kartonkikoneilla on pyrittävä mahdollisimman alhaiseen kuituorientaatioon. /9, s. 239; 7/

Taivutusjäykkyys saavutetaan parhaiten valmistamalla pinnat tiheämmästä ja keskikerros bulkkisemmasta massasta. Koska symmetrinen kolmikerroskartonki on monikerrostuotteista tärkein yksittäistapaus, on alla esitetty kyseisen rakenteen taivutusjäykkyyden laskemiseen tarkoitettu kaava (1) /7/:

$$S = \frac{E_2 d_2^3}{12} + \frac{E_1 (d^3 + d_2^3)}{12} \quad (1)$$

missä E_1 on pinnan kimmokerroin, E_2 keskikerroksen kimmokerroin, d koko kartongin paksuus ja d_2 keskikerroksen paksuus.

Kuten kaavasta huomataan, on kartongin paksuudella suuri vaikutus taivutusjäykkyyteen ja siten mekaanisella massalla saavutettava keskikerroksen bulkkisuus on eduksi. Mekaanisen massan bulkkinen luonne perustuu sen jäykkiin ja mukautumattomiin kuituihin. Pintakerroksissa käytettävän kemiallisen massan ollessa puolestaan tiheämpää ja paremmin sitoutuvaa saadaan pinnoille aikaan riittävä kimmokerroin. Tiheämmillä pinnoilla saavutetaan myös parempi sileys ja siten painettavuus. Massakoostumuksen lisäksi jäykkyyteen voidaan vaikuttaa paljolti myös bulkkisuutta säästäväillä laiteratkaisuilla, kuten kenkäpuristimilla. /6/

Taivutusjäykkyyden lisäksi tulee kartongeilla olla hyvä puristuslujuus, sillä usein pakkauksia pinotaan toistensa päälle kuljetuksen ja varastoinnin aikana. Myös

puhkaisulujuus on kriittinen tekijä pakkauksen kestävyuden sekä tuotteen suojaavuuden kannalta eikä tuotteen palstautumista kerrosten väliltä tai niiden sisältä saa tapahtua liian helposti. Taivutusjäykkyys ja palstautumisljuus kehittyvät usein vastakkaisiin suuntiin, ja siten näiden kahden yhtäaikainen saavuttaminen on hankalaa. Usein pyritäänkin maksimaaliseen taivutusjäykkyyteen siten, että palstautumisljuus vielä tyydyttää asiakkaan tarpeet. /4; 11/

Hyvä märkälujuus helpottaa kartongin ajettavuutta kartonkikoneella ja pintakerrosten huokoinen rakenne helpottaa vedenpoistoa paksusta keskikerroksesta kuivatusosalla. Vetolujuus kuivana on puolestaan kriittisempää jatkojalostusprosessien kannalta, mutta kartongeilla tämä ominaisuus saavutetaan helposti eikä sitä siksi pidetä kriittisenä.

Kartongin liiallinen käyristyminen puolestaan voi aiheuttaa ongelmia pakkauslinjaston syötössä. Syötön kannalta paras tilanne on silloin, kun kartonkiaihiot ovat hieman alaspäin käyristyneitä. Myös pinnan liian suuri kitka aiheuttaa ongelmia, sillä aihiot saattavat tarttua toisiinsa kiinni. /4/

Monikerroskartongin toiminnallisiin ominaisuuksiin voidaan lukea myös sen saumattavuus sekä nuutattavuus. Nämä ominaisuudet ovat tärkeitä pakkauslinjastolla, kun aihioista valmistetaan valmiita rasioita ja laatikoita. Nuutattavuuden kannalta tärkeitä kartongin ominaisuuksia ovat joustavuus ja venymä, vetolujuus sekä z-suuntainen kokoonpuristuvuus. Myös kartongin palstautumisominaisuudet ovat nuutattavuuden kannalta tärkeitä, sillä itse nuuttautumistapahtumassa kartongin tulee jakaantua niin moneen ohueen kerrokseen kuin vain mahdollista ilman, että kartongin pinta hajoaa. Uloimman kerroksen materiaalilta vaaditaan luonnollisesti eniten venyvyyttä. Joustavuutta ei pystytä suoranaisesti mittaamaan, mutta siitä saadaan kuva murtositkeyden ja taivutusjäykkyyden avulla. /4/

2.3.2 Visuaaliset ominaisuudet

Koska pakkauksen tehtävänä on tuotteen suojaamisen lisäksi tehdä siitä houkutteleva ja ohjata näin kuluttajan ostokäyttäytymistä, ovat kartongin painettavuusominaisuudet tärkeässä roolissa. Pakkauksia suunniteltaessa tulee houkuttelevuuden lisäksi kuitenkin myös huomioida, että yksi pakkauksen tehtävistä on antaa kuluttajalle yhä enenevässä määrin informaatiota tuotteesta ja siksi painatus tulee pitää myös selkeänä. Painettavan pinnan onkin siis oltava riittävän sileä, kiiltävä ja vaalea hyvän ulkonäön aikaansaamiseksi, mutta myös pienten yksityiskohtien toistamisen vuoksi. /4; 2, s. 322/

Visuaalisia ominaisuuksia pidetään pitkälti pintakerrosten vaatimuksena, mutta huonoa keskikerrosta ei kuitenkaan pystytä peittämään ohuilla pintakerroksilla. Siksi myös runkokerroksen formaation tulee olla riittävän tasainen ja vaaleuden riittävän korkea loppukäyttökohteen vaatimuksiin. Pintakerroksilla puolestaan tulee olla riittävä opasiteetti, jotta ne pystyvät peittämään mahdollisesti tummemman keskikerroksen. Kartongin taustapuolelle ei useinkaan aseteta niin suuria vaatimuksia kun pintapuolelle, sillä usein se jää piiloon pakkauksen sisälle. Pintojen ominaisuuksia voidaan tarvittaessa parantaa päällystämällä kartonki kertaalleen tai kahdesti. /4; 11/

2.3.3 Muut ominaisuudet

Kartongeille tärkeä ominaisuus on myös kosteuden, kaasujen ja makujen vastustus, sillä pakattaessa elintarvikkeita, ei tuotteeseen saa varastoinnin aikana tulla laatumuutoksia. Koska kaikkien loppukäyttökohteiden vaatimuksiin eivät kartongin omat läpäisemättömyysominaisuudet ole riittäviä, joudutaan pintaan lisäämään usein muovi- tai alumiinipäällyste. Valmistettaessa nestepakkauksia tai juomakuppeja on tärkeää selvittää tuotteen raakareunaimelmä (REP), joka kertoo, kuinka paljon kosteutta imeytyy kartonkiin sen reunasta. /2, s. 322; 35/

Useita monikerroskartonkeja käytetään elintarvikepakkaamiseen, joten ne eivät saa sisältää mikrobeja tai myrkkijä. Valkaistu sellukuitu on puhtausominaisuuksiltaan parasta massaa, sillä se ei sisällä raskasmetalleja tai muita epäpuhtauksia, kun mekaaninen massa puolestaan sisältää sellukuitujen lisäksi myös ligniiniä ja hartseja. Kierrätettyjä kuituja ei voida elintarvikepakkauksissa käyttää kuin

sekundaaripakkaamiseen, sillä ne saattavan sisältää jopa satojatuhansia kertoja enemmän mikrobeja kuin neitseelliset kuidut. Kemikaalien käyttö tulisi myös pitää vähäisenä, sillä elintarvikkeet ottavat helposti vastaan niistä siirtyviä vieraita makuja, hajuja tai värejä. /4; 2, s. 322; 8, s. 171/

2.4 Monikerroskartonkikone

Monikerroskartongin valmistukselle on varmasti lähes yhtä monta tapaa kuin on valmistajiakin. Usein koneet ovat uusittuja yksi- tai kaksikerroskoneita, joiden viira- ja puristosaa on modifioitu vastaamaan paremmin nykyistä tekniikkaa ja tämänhetkisiä vaatimuksia. Kuten jo aikaisemmin on todettu, monikerrosisen rakenteen valmistamiseen on siirrytty lähinnä neliömassan kasvun aiheuttamasta vedenpoistovastuksen lisääntymisestä sekä erilaisten raaka-aineiden käytön antamasta taloudellisesta edusta. /22/

Koska tämän työn kokeellinen osa käsittelee monikerroskartongin liitoskosteuksien hallintaa, keskitytään tässä osassa vain kartonkikoneen rainanmuodostusosaan ja sen toimintaan.

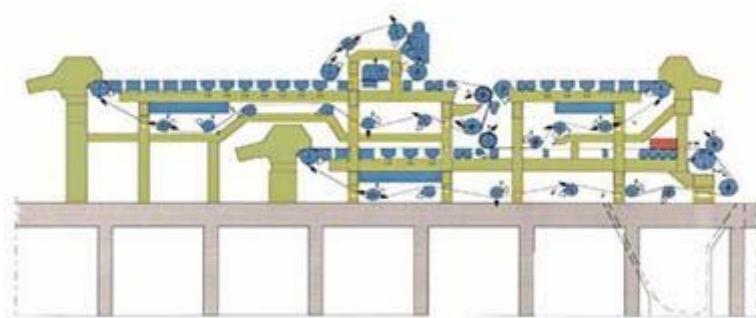
2.4.1 Rainanmuodostusosa

Kartongin kerrostaminen voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla. Ensimmäinen vaihtoehto on toteuttaa kerrostaminen jo perälaatikossa, mutta tällöin viiraosan vedenpoistokapasiteetti on neliöpainoa rajoittava tekijä, aivan kuten yksikerrosrakenteellakin. Toinen tapa on kerrostaminen viiran päälle ja kolmantena tapana on erikseen muodostettujen rainojen yhdistäminen. Kartongin neliömassaa muutetaan säätämällä keskikerroksen neliömassaa pintojen pysyessä pääasiassa vakiona /3, s. 73; 9, s. 43/

Yleisin näistä kolmesta tavasta on muodostaa kaikki kerrokset omilla tasoviirayksiköillään ja yhdistää kerrokset viiraosan lopulla taustakerroksen päälle (kuva 4). Tasoviiran vedenpoistoon on perehdytty tarkemmin seuraavassa luvussa.

Nykyisillä kartonkikoneilla vähintään yhdellä kerroksella on laimennussäätöinen perälaatikko, ja se asennetaan yleensä paksuimmalle eli keskimmaiselle kerrokselle. Laimennusperälaatikon suosio keskimmaisella kerroksella selittyy sen antamalla mahdollisuudella hallita neliömassaprofiilia, sillä paksuimman kerroksen laadulla on pitkälti vaikutus koko tuotteen laatuun (mikäli keskikerroksen formaatio on liian huono, ei ohuilla pintakerroksilla pystytä sitä korjaamaan). Tasaisella neliömassaprofiililla taataan hyvät ja tasaiset painettavuus-, jäykkyys- ja pintaominaisuudet. Muita käytettäviä perälaatikoita ovat hydrauliset perälaatikot sekä reikätelaperälaatikot. /22; 3, s. 131–134; 35/

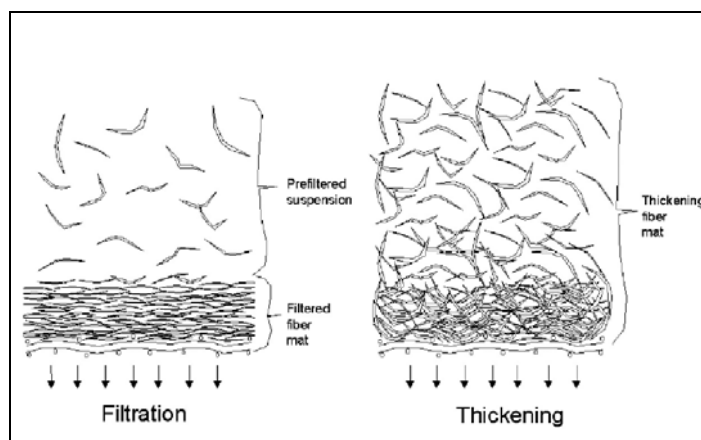
Tasoviirakonstruktiossa keskikerros voidaan varustaa myös hybridiformerilla, kuten kuvasta 4 nähdään, tai kerrokset voidaan tuottaa kaikki erillisillä kitaformereilla. Kaksisuuntaisen vedenpoiston etuina on koneen suurempi mahdollinen ajonopeus, parempi formaatio sekä rainan vähäisempi kaksipuoleisuus. Tasoviiralla voidaan kuitenkin saavuttaa parhaimmat ja tasaisimmat lujuusominaisuudet sen yksisuuntaisen vedenpoiston ansiosta. Kaksisuuntaisella vedenpoistolla syntyvä vähentynyt hienoainemäärä vedenpoiston keskipinnassa luo kerrokseen paikallisesti heikon palstautumislujuuden, kun tasoviiravedenpoistolla hienoainejakauma on lineaarinen koko kerroksen paksuudelta eikä samanlaista heikkoa kohtaa muodostu. Matalilla nopeuksilla voidaan tasoviiralla käyttää rintatelana ravistajatelaa formaation parantamiseksi. /22; 2, s. 272; 26, s. 245/



Kuva 4 Tyypillinen kolmikerroskartonkikoneen viiraosa, jossa keskikerroksella hybridiformeri /37/

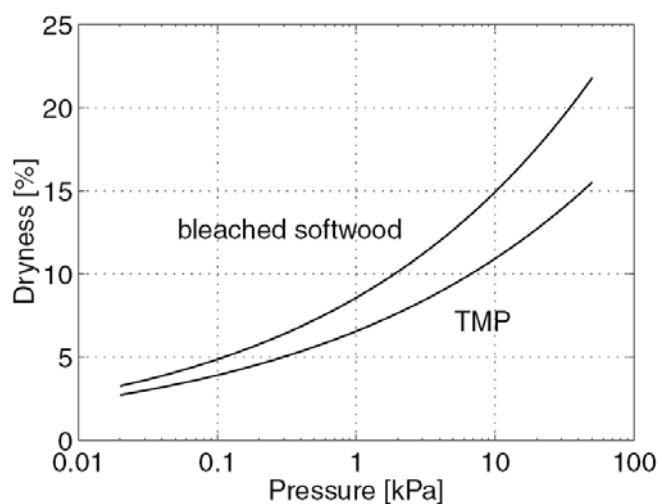
2.4.2 Tasoviiran vedenpoiston teoria

Vesi poistuu tasoviiralla kolmella eri mekanismilla: alussa suotautumalla, tämän jälkeen tiivistymällä ja lopuksi imujen avulla. Suotautumisvaiheessa viiran päälle muodostuu massakakku, jonka yläpuolella olevan suspension sakeus säilyy samana kuin perälaatikkosakeus. Kun koko vapaa suspensio on kuivatettu, alkaa rainan tiivistyminen, jossa koko suspension tiheys kasvaa (kuva 5). Kuituvälit tyhjenevät tällöin vedestä ja raina alkaa läpäistä ilmaa. Vaiheista ensimmäisessä painovoimalla on suuri merkitys, mutta se pienenee voimakkaasti suotautumisen loputtua. /3, s. 137; 2, s. 267; 22; 37/



Kuva 5 Tasoviiran vedenpoisto sakeutumalla ja tiivistymällä /21/

Alkuvaiheessa suotautuminen on nopeaa, sillä tällöin viiran päälle ei ole muodostunut kuitukerrosta. Suotautuminen kuitenkin hidastuu nopeasti viiran päälle muodostuneen kuitukerroksen massan ja samalla sen aiheuttaman suotautumisvastuksen kasvaessa. Suotautumisvaiheen jälkeen massasuspension sakeus on noin 3–4 %, jonka jälkeen massakakun viiraa vasten luoma paine alkaa poistaa vettä rainasta. Kun tämä paine on saavuttanut noin 10 kPa arvon, on suspension sakeus TMP massalla noin 10 % ja kemiallisella pitkäkuitusellulla noin 15 %, kuten kuvasta 6 nähdään. Massan aiheuttaman, viiraan kohdistuva



puristuspuheen kasvu vaikuttaa siis voimakkaammin sellun kuin mekaanisen massan vedenpoistoon. /22; 37/

Kuva 6 Massan aiheuttama paine kuiva-aineen funktiona kahdella eri massatyypillä /22/

Tasoviiralla suotautuminen on kuitenkin hallitseva vedenpoistotapa, ja tämä aiheuttaa perinteiselle vedenpoistolle tyypillisen kerroksellisen rakenteen. Tämän kaltaisessa vedenpoistossa kuidut jakautuvat viiralle tasaisesti eikä radan paksuussuuntaan muodostu kuitujen välille kovinkaan paljoa yhdistäviä sidoksia. /22; 37/

Darcyn laki

Yhtenä viiraosan vedenpoiston perusteorioista pidetään Darcyn hidasta suotautumista kuvaava yhtälöä. Darcyn laki on kaavan 3 mukainen /38, s. 52/:

$$\dot{V} = \frac{kA\Delta p}{\eta d} = \frac{A\Delta p}{R\eta d} \quad (3)$$

missä \dot{V} on tilavuusvirta kerroksen läpi, k permeabiliteetti, A pinta-ala, Δp paineero kuitumaton yli, η viskositeetti, d kerroksen paksuus ja R permeabiliteetin käänteisarvo eli suotautumisvastus.

Darcyn lain esittämä yhtälö on kuitenkin tarkoitettu laminaariselle virtaukselle homogeenisen ja kokoonpuristumattoman kerroksen läpi, josta todellinen vedenpoisto poikkeaa paljolti. Paitsi, että nämä kolme olettamusta eivät pidä paikkaansa, on myös huomioitava, että rainan päälle suotautuu jatkuvasti lisää kuituja, jolloin sen suotautumisvastus R muuttuu. Vedenpoiston edetessä myös rainan paksuudessa tapahtuu muutoksia. /37; 38, s. 52–53/

Rainasta poistuvan veden laskemiseksi on myös arvioitava vedenpoistoa ajava paine-ero. Rintapöydällä vedenpoisto perustuu lähinnä painovoimaan, jonka jälkeen paine-ero synnytetään foililistoilla tai vakuumpumpuilla. Koska vedenpoisto tapahtuu tasoviiralla vain yhteen suuntaan, on vedenpoistopaine kuitenkin helppo määrittellä rainan pintojen yli vaikuttavaksi paine-eroksi. Viiran alapuoliseen paineeseen vaikuttavat vedenpoistoelementit, mutta yläpuolinen paine pysyy koko ajan vakiona (ilmanpaine). Tasoviiran vedenpoistoelementtejä on käsitelty tarkemmin luvussa 4.1. /37; 38, s. 52/

Suurimana ongelmana Darcyn yhtälön soveltamisessa on permeabiliteetin määrittäminen, joka on täysin riippuvainen väliaineen materiaalista: hiukkasten koosta, muodoista, pintaominaisuuksista sekä erityisesti huokoisuudesta. /38, s. 53/

Kaavasta kuitenkin nähdään, että massakerroksen läpi kulkeva tilavuusvirta kasvaa suoraan verrannollisena vaikuttavaan vedenpoistopaineeseen. Tästä voidaan siis päätellä viiran alapuolisen paineen kasvattamisen nopeuttavan suotautumista. Paineen kasvaessa kuitukerros kuitenkin tiivistyy ja samalla sen suotautumisvastus kasvaa, mikä rajoittaa paineen kasvattamisen mahdollisuutta. Massan viskositeetin pienentämisellä huomataan myös olevan vedenpoistoa nopeuttava vaikutus. Viskositeettiä pystytään pienentämään tiettyyn rajaan asti massan lämpötilaa nostamalla. /37/

Koska suotauttamisen määrittäminen Darcyn lain avulla ei ole mielekästä sen ollessa riippuvainen massasuspension hetkellisestä sakeudesta sekä muista vaikeasti määritettävistä ominaisuuksista, on tarkoitukseen luotu myös yksinkertaistetumpia yhtälöitä.

Yksi näistä suotautumisvastuksen laskemiseen tarkoitetuista kaavoista on yhtälö 4, jonka kehittelijöinä ovat olleet Wahlström & O'Blenes /22/:

$$t = \frac{G}{S} (\Delta p)^n W^L \quad (4)$$

missä t on suotautumisaika, W neliömassa, Δp vaikuttava paine-ero, S sulpun sakeus ja L , n sekä G kokeellisesti saatuja, kuidulle ominaisia parametrejä. L vaihtelee välillä 1,8–3,2.

Kuten yhtälöstä 4 nähdään, on neliömassa suoraan verrannollinen suotautumisaikaan. Siksi neliömassan kasvaessa suotauttaminen kannattaakin tehdä kaikille kerroksille erikseen ja mahdollisuuksien mukaan pyrkiä nostamaan vedenpoistokapasiteettia myös siirtymällä kaksipuoleiseen vedenpoistoon. Samalla koneella ajettava laaja neliömassa-alue aiheuttaa myös ongelmia koneen mitoituksessa, sillä vedenpoiston on oltava riittävän tehokas suurten neliömassan tuotteille, mutta kuitenkin on säilytettävä mahdollisuus ajaa kevyempiä lajeja nostamatta niiden kuiva-ainepitoisuutta liikaa ennen kerrosten yhdistämistä. /9, s. 46/

Suotautumisaikaan pystytään vaikuttamaan paljolti raaka-ainevalinnoilla, sillä käytetyn massan ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti suotautuneen kuitukerroksen aiheuttamaan vastukseen. Vaikeinta vedenpoisto on paljon hienoaainetta sisältävillä (40–45 CSF) mekaanisilla hiokemassoilla, mutta tällaista massaa ei kartongin valmistuksessa käytetä sen huonojen bulkkiominaisuuksien vuoksi. Myös pitkälle jauhettu kemiallinen massa (30–35 °SR) on tehokkaan vedenpoiston kannalta hankala. Koska kyseistä massaa kuitenkin käytetään pääasiassa ohuempiin pintakerroksiin, joiden neliömassat ovat pieniä, ei sen suotautumisvastus ole kokonaistuotannon kannalta kovinkaan merkittävä. Luonnollisesti vähän hienoaainetta sisältävät massat ovat puolestaan helposti suotautuvia, mutta niiden paperitekniset ominaisuudet ovat puolestaan rajalliset.

Yleisesti voidaan todeta, että veden virtaukseen massasuspension läpi vaikuttavat seuraavat asiat /22/:

- suspension sakeus ja massakomponentit
- kuituominaisuudet (dimensiot, turpoamisaste, elastiset ominaisuudet)
- kemialliset olosuhteet, varsinkin hieno- ja täyteaineen kasautuminen kuituainekseen retentioaineiden avulla
- perälaatikkosuihkun ominaisuudet
- viiran ominaisuudet
- vedenpoiston aiheuttaman paineen kesto ja suuruus.

3 MONIKERROSKARTONGIN PALSTAUTUMINEN

Kartongin palstautuminen käsitetään sen tasonsuuntaiseksi halkeamiseksi ja palstautumislujuus kartongin kyvyksi kestää paksuussuuntaista vetoa.

Monikerroskartongeilla palstautuminen voi tapahtua joko jonkin kerroksen sisältä tai kahden kerroksen välisestä rajapinnasta. Kerroksen sisäinen palstautuminen tapahtuu yleisimmin keskikerroksessa, sillä tämä sisältää usein heikomman sitoutumiskyvyn omaavaa mekaanista massaa. Kerrosten välinen palstautuminen ei puolestaan ole yleensä ongelma, mikäli kerrostaminen toteutetaan jo perälaatikossa, mutta erikseen suotautettuja rainoja yhdistettäessä viiraosan lopussa ei kerroksien välisestä sitoutumisesta tule yhtä hyvää. Tällaisella menetelmällä valmistetuissa monikerroskartongeissa kerrosten yhtymäkohdat ovatkin heikoimpia, sillä kuituverkko on näissä kohdissa epäjatkua. /22; 7/

Palstautuminen on riippuvainen kuitujen välisistä sidoksista. Sidokset muodostuvat pääasiassa selluloosan tai hemiselluloosan hydroksyyliyhymien välisistä vetysidoksista sekä Van der Waalsin voimien avulla. Samalla tavoin, kun kerroksen sisäinen lujuus riippuu sen sisältämistä kuitujen välisistä vetysidoksista, riippuu kerrosten välinen lujuus niiden välillä olevista vetysilloista. /9, s. 240; 24/

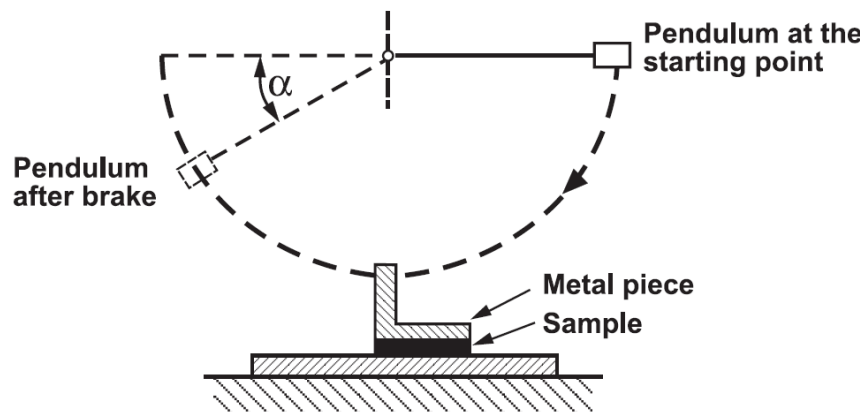
3.1 Palstautumislajuuden mittaaminen

Kartongin palstautumislajuutta määritettäessä pyritään selvittämään joko vaadittava energia tai voima. Tunnetuimpia ja eniten käytettyjä menetelmiä ovat Scott Bond -mittaus, joka perustuu kartongin halkeamiseen vaadittavaan energiaan ja z-suuntainen vetolajuustesti, joka puolestaan kertoo vaadittavan voiman. Lisäksi on käytössä delaminoitumistesti eli niin sanottu ”Peel Wheel” -testi, jota käytetään kuitenkin enemmän muovikalvon ja kartongin välisen adheesion määrittämiseen. Ideana tässä testissä on kiinnittää testikappaleen toinen pää tasapainotettuun pyörään, joka pystyy pyörimään pienellä kitkalla. Energian kulutukseen vaikuttaa palstautumisen lisäksi myös kartongin taipuminen ja testin käyttöä rajoittaa myös se, että sillä mitataan aina tietyn, ennalta määrätyn kerroksen palstautumista. Joissakin tapauksissa tämä ominaisuus voi kuitenkin olla myös eduksi. /7; 27/

Myös IGT-nukkautumislajuustestillä voidaan tutkia kartongin palstautumistaipumusta. Menetelmä on ensisijaisesti tarkoitettu pintalajuuden määrittämiseen, mutta käytettäessä mahdollisimman tahmeaa painoväriä ja riittävän suurta nopeutta korreloi menetelmä hyvin myös kartongin palstautumiskäyttäytymisen kanssa offset-painossa.

Scott Bond -testi

Testi suoritetaan kuvan 7 mukaisella laitteella. Kartonkinäyte kiinnitetään kaksipuoleisella teipillä laitteen rungon ja alumiinisen kulman väliin, jonka jälkeen heiluri kohdistetaan L:n muotoiseen kulmaan aiheuttaen palstautumisen kappaleen toisesta päästä alkaen. Heiluri osuu L:n muotoiseen palkkiin aiheuttaen palstautumisen. Halkeaminen on nopea ja muistuttaa käytännön tilannetta, sillä mittaukseen vaikuttaa myös leikkausvoimia. Mittaustulos on heilurienergia, joka vaaditaan pinta-alaltaan 1 m² kokoisen näytteen palstautumiseen (J/m²), ja se nähdään suoraan mittarin asteikosta heilurin potentiaalienergian vähentymisenä (α kuvassa 7). Nykyisin on käytössä myös digitaalisia mittalaitteita, jolloin tulosta ei tarvitse lukea asteikolta. /7; 32; 39/

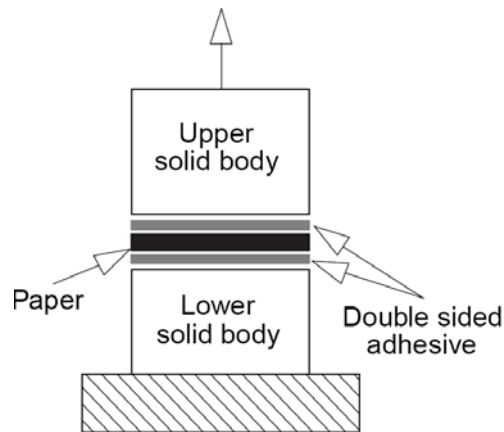


Kuva 7 Scott Bond -testin periaate /15/

Vaikka Scott Bond onkin yleisesti käytössä oleva menetelmä, on sillä kuitenkin myös heikkouksia. Scott Bond -testin heikkouksia ovat sen alkeellisuus sekä mittauksen epätarkkuus, jolloin tulokset eivät ole niin tarkkoja kuin kehittyneemmillä menetelmillä. Digitaaliset mittalaitteet vähentävät kuitenkin oleellisesti tuloksen ilmoittamisessa tapahtuvia virheitä. Näytteen paksuudella on myös merkitystä laitteen geometrian muuttumisen kautta, ja näytteen puristaminen alumiinikulman alle saattaa vaikuttaa näytteen kuiturakenteeseen. Yksi Scott Bond -testin ja z-suuntaisen vetolujuustestin yhteinen heikkous on niiden riippuvuus käytettävästä teipistä. Teipin pito saattaa olla heikentynyt, jolloin halkeaminen tapahtuu virheellisesti teipin ja kartongin välistä. /32/

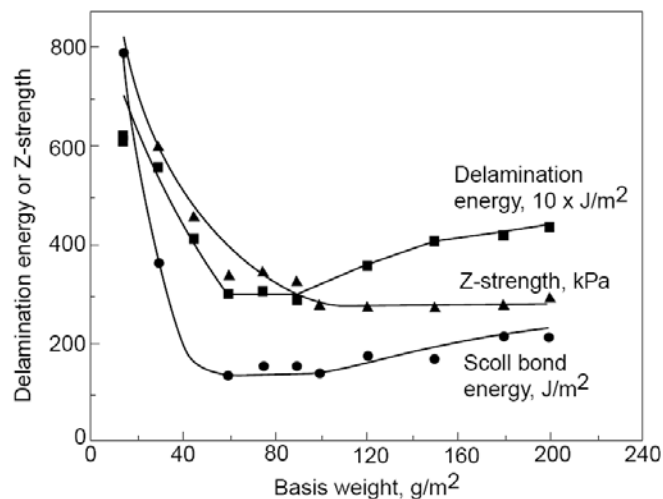
Z-suuntainen vetolujuustesti

Z-suuntaisen vetolujuustestin periaate on nähtävissä kuvassa 8. Myös tässä menetelmässä näytteeseen kiinnitetään teipit molemmin puolin, minkä jälkeen yhdistelmä asetetaan kiinteiden kappaleiden väliin. Testin antama tulos on voima (kPa), joka vaaditaan kartongin palstautumiseen ja se mittaa täysin kohtisuoraan aiheutettavaa kuormitusta, jolloin leikkausvoimilla ei ole vaikutusta testin tulokseen. Etuna Scott Bond -mittaukseen verrattuna voidaan pitää näytteiden helpompaa valmistelua ja siten vaivattomampaa mittausten toistoa. /7; 39/



Kuva 8 Z-suuntaisen vetolujuustestin periaate /7/

Koska nämä kaksi eniten käytettyä testiä mittaavat eri asioita (toinen energiaa, toinen voimaa) ja niiden repäisyprosessi on hieman erilainen, on niiden korrelaatiota ollut syytä tutkia. Neliöpainon ollessa vakio ja kartongin ominaisuuksia muutettaessa ainoastaan jauhatuksen tai massakomponenttien kautta, korreloivat testit hyvin. Sen sijaan neliömassan muutos vaikuttaa tuloksiin eri tavalla, kuten kuvasta 9 on nähtävissä. Kuten kuvasta huomataan, ovat kaikkien testien antamat arvot suuria pienillä neliömassoilla, mikä johtuu todennäköisimmin teipin pintakerroksia vahvistavasta vaikutuksesta. Kun neliömassa kasvaa noin 80 g/m^2 :iin ja sen yli, myös palstautumiseen vaadittava energia kasvaa, mutta voima pysyy vakiona. Vakiona pysyvä voima antaa ymmärtää, ettei rainan rakenne enää muutu mentäessä tämän neliöpainorajan yli, mutta paksuuden ja massan kasvaessa energiaa kuluu enemmän muihin vaurioihin kuin palstautumiseen. Koska Scott Bond -testin liike on y- ja z-suuntaisten vektorien yhdistelmä, kuluu energiaa osittain myös tasonsuuntaisiin vaurioihin. /7; 13/



Kuva 9 Palstautumislujuus arvoja neliömassan funktiona /7/

Kuvan 9 delaminoitumisenergiassa tapahtuva suuri kasvu selittyy lisääntyvästä kartongin paksuussuuntaisesta murtumisesta. Tällöin energiaa kuluu siis muidenkin kuin valitun kerroksen palstauttamiseen. /7/

3.2 Palstautumista aiheuttavat rasitukset

Riittävä palstautumislujuus on välttämätöntä monissa jatkojalostus- ja loppukäyttöprosesseissa. Valmis pakkaus ei saa palstautua kerrosten välisistä rajapinnoista kosteusvaihteluiden vaikutuksesta varastoinnin aikana eivätkä jatkojalostuksessa kartonkiin kohdistetut rasitukset saa aiheuttaa palstautumista. Kartongista valmistetun pakkauksen tulee myös aueta vaivattomasti ilman, että kartonki halkeaa.

Pääasiallinen painatustapa kartongeille on arkkioffset, jossa vaaditaan riittävää sileyttä, z-suuntaista lujuutta sekä pintalujuutta. Syväpainoa käytetään usein suurien erien painamiseen ja tämä menetelmä vaatii erittäin hyvän sileyden, mutta paksuussuuntaiselle lujudelle se ei aseta kovinkaan suuria vaatimuksia. Arkkioffsetissa painovärit ovat erittäin tahmeita ja viskositeetti voikin olla huoneenlämpötilassa jopa 50 Pas. Kun tahmea painoväri halkeaa painonipin jättöpuolella pinnan suuntaisten leikkausvoimien ja pintaa vastaan kohtisuoran vetojännityksen vaikutuksesta, on kartongin kerrosten välisen adheesion oltava värin halkeamisvastusta suurempi. Mikäli näin ei ole, tapahtuu halkeaminen kartongissa. /11; 6; 23/

Koska pakkausten ulkonäköön kiinnitetään yhä enemmän huomiota, on kartonkien painatuksessa siirrytty yhä enenevässä määrin neliväripainatukseen. Tämä tarkoittaa, että kartonkia joudutaan rasittamaan useaan otteeseen samasta kohdasta painettaessa värejä päällekkäin, jolloin jokaisen värikerroksen halkeaminen heikentää kartongin rakennetta. On myös huomioitava, että vaikka ensimmäisessä nipissä levitettäisiin kohtaan ainoastaan vettä, saattaa sekin heikentää kartongin rakennetta tunkeutumalla kuitujen välisiin sidoksiin. /23/

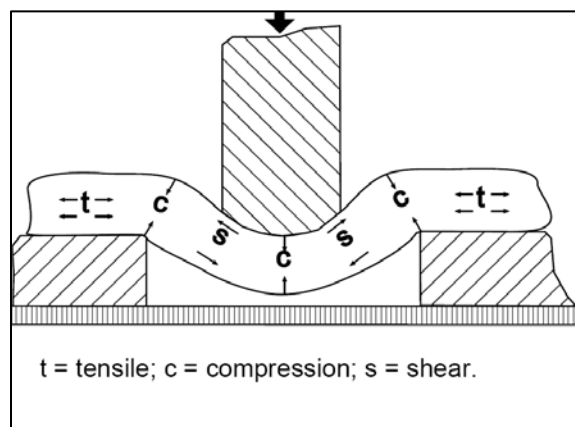
Elintarviketarkoituksiin valmistettava kartonki päällystetään usein muovilla sen läpäisemättömyysominaisuuksien parantamiseksi. Muovipäällystyksen kriittisimpänä tekijänä kartongin palstautumisen kannalta pidetään prosessissa esiintyviä korkeita lämpötiloja. Tämä perustuu kartongissa olevan kosteuden höyrystymiseen, jolloin kuiturakenne saattaa löyhtyä ja siksi myös palstautumislujuus heiketä, mikäli kosteus ei pääse poistumaan radasta vapaasti. On myös mahdollista, että laminoinnin jälkeen muovi saattaa kiinnittyä jäähdystystelaan, jolloin syntyy painovärin halkeamista vastaava tilanne. Tällaisen tilanteen kannalta pinnaltaan erittäin sileät telat ovat pahimpia. /19/

Myös kaikki sellaiset kartongin käsittelyt, jossa sitä taivutetaan pienihalkaisijaisten telojen yli tai kartonkia vedetään liian jyrkissä kulmissa, heikentää palstautumislujuutta. Tämä on kriittisintä paksuille kartonkilajeille, joiden taivutusjäykkyys on suurin.

On myös tutkittu, että kartonkikoneen kuivatusosalla tapahtuva eri materiaalien erilainen käyristyminen saattaa aiheuttaa kerrosten väliin jännityksiä, jotka heikentävät niiden välistä sitoutuneisuutta. Palstautumislujuus saattaa kuivatuskutistumaprofiilin vuoksi olla radan keskikohdassa jopa 20 % heikompi kuin radan reunoilla. Palstautumislujuus kasvaa radan kutistuessa ja kuitujen lähentyessä sekä pienenee radan venyessä, jolloin kuituihin kohdistuu rasitusta. Tätä päätelmää tukevat myös Suvi Katajamäen diplomityössään tekemät havainnot /31/. Hän myös toteaa Scott Bond -arvoissa syntyvän eron olevan ohuemmillä kartongeilla suurempi kuin paksuilla, kun kartongin runkokerroksessa on käytetty painehioketta. Kuivatusosalla palstautumista saattavat aiheuttaa myös liian tiiviit pintakerrokset, jotka estävät vesihöyryn pääsyn pois kartongin keskikerroksesta. /28/

Mahdollisimman korkea z-suuntainen lujuus ei kuitenkaan aina ole suotavaa, sillä nuuttaus vaatii kartongin jakautumisen nuutin kohdalta mahdollisimman moneen ohueen kerrokseen niin, että rakenne muilla alueilla pysyy yhtenäisenä. Muita tärkeitä ominaisuuksia nuutin onnistumisen kannalta ovat vetolujuus, elastisuus ja venymä sekä z-suuntainen kokoonpuristuvuus. /4; 6/

Nuuttaus aiheuttaa kartongissa plastisen muodonmuutoksen ja nuutin taittamisen aikana kartonki delaminoituu ohuiksi kerroksiksi, jotka eivät saa pullistua ulos tasosta. Monikerrosrakenne onkin nuuttauksen kannalta haluttu, sillä kerrosten välinen sitoutuneisuus on pienempi kuin kerroksen sisäinen sitoutuneisuus, ja siten delaminoituminen tapahtuu helpommin kuin yksikerrosrakenteessa. Nuuttauksen aikana kartonkiin kohdistuu vetoa, puristusta sekä leikkausvoimia, kuten kuvasta 10 nähdään. Koska pintakerrokseen vaikuttaa nuuttauksen aikana venyttävä voima sekä puristusvoima, tulee materiaalin olla elastinen murtumisen ehkäisemiseksi. Kartongin murtumistaipumus onkin usein nuuttauksen rajoittava tekijä. /4/



Kuva 10 Nuuttauksen aikana kartonkiin vaikuttavat voimat /4/

Nuuttauksen aikana kartonkia puristetaan nuuttausterän ja alla olevan raon väliin. Hyvä nuutti on kohtuullisen syvä ja kapea tarkan taiton takaamiseksi. Koska kartonkiin kohdistuvat puristus-, veto- ja palstautumisrasitukset ovat sitä voimakkaampia, mitä suurempi on nuuttaussyvyys ja mitä kapeampi on nuuttausleveys suhteessa kartongin paksuuteen, ei paksuimmilla kartongeilla ole mahdollisuutta päästä taiton kannalta parhaaseen lopputulokseen. /9, s. 243/

3.3 Kerrosten väliseen palstautumiseen vaikuttaminen

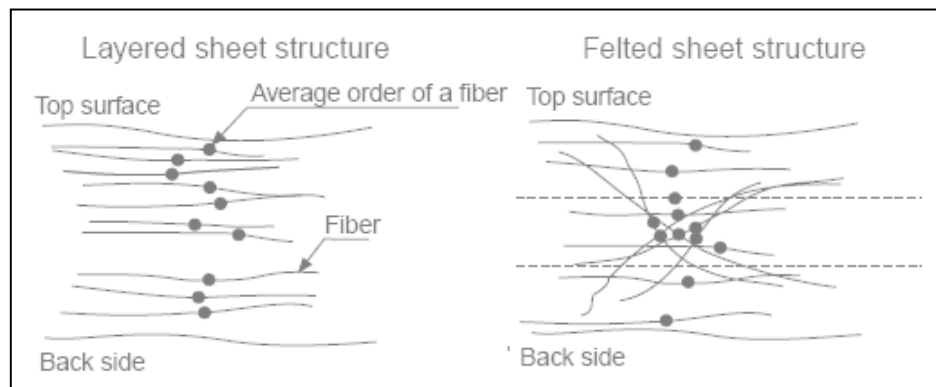
Yleisesti voidaan todeta, että kaikki, mikä lisää kuitujen välisiä sidoksia lisää myös lujuuksia. Koska monikerroskartongin keskikerroksella on suurin neliömassa ja se valmistetaan usein huonommin sitoutuvasta mekaanisesta massasta, on tämän nimenomaisen kerroksen muodostus palstautumislajuuden kannalta tärkein. Kuitujen suhteellinen sitoutumisaste on sitoutumisen kannalta kriittistä ja riippuu

kuitujen poikkileikkausmitoista sekä niiden taipuisuudesta. Sitoutumisastetta voidaan hallita paitsi massatyypin valinnalla, myös jauhatuksella. /9, s. 241; 20/

Kerrosten välisen palstautumisen kannalta tärkeimpiä muuttujia ovat jauhatusaste, kerrosten kuiva-ainepitoisuudet sekä hienoaineen jakautuminen z-suunnassa. Näistä jauhatusaste ja hienoainejakauma ovat luonnollisesti vaikuttamassa myös kerroksen sisäiseen palstautumisljuuteen, johon vaikuttaa voimakkaasti myös suotautettavan rainan rakenne. /9, s. 240/

3.3.1 Rainan rakenne

Rainan rakenne voi olla joko kerroksellinen tai huopautunut (kuva 11). Näistä jälkimmäinen on kerroksen sisäisen palstautumisljuuden kannalta haluttu, sillä kuidut ovat sidoksia vahvempia ja rikotaessa rakenne paksuussuunnassa täytyy tällöin sidosten lisäksi rikkoa myös kuituja. Kerroksellisen rakenteen halkeaminen sen sijaan voi tapahtua kuituja rikkomatta, mikä vaatii vähemmän voimaa. /7; 20/



Kuva 11 Rainan kerroksellinen ja huopautunut rakenne /20/

Kerroksellinen kuituverkko muodostuu silloin, kun kuidut saavat laskeutua viiralla rauhassa yksi toisensa jälkeen vedenpoiston suotauttamisvaiheessa. Tällöin kuidut asettuvat määrättyyn järjestykseen rainan vertikaalisuunnassa, jolloin kuituja on tasainen määrä koko paksuussuunnassa eivätkä ne juuri risteä keskenään. Kun rainan rakenne on puolestaan huopautunut, eivät kuidut ole tasaisesti järjestäytyneet, vaan niiden määrä saattaa vaihdella paksuussuunnassa ja kuidut myös risteävät huomattavasti useammin kuin kerroksellisessa rakenteessa. /20/

Huopautuneen rakenteen aikaansaamiseksi tulisi perälaatikkosakeuden olla mahdollisimman korkea ja viiraosan vedenpoiston jaksottainen. Korkea sakeus ei anna kuiduille niin paljoa liikkumavaraa kuin matala sakeus, mikä vaikeuttaa kuitujen konesuuntaista orientoitumista. Jaksottainen vedenpoisto puolestaan aiheuttaa kuitujen ”heilumista” viiran päällä, jolloin ne eivät pääse asettumaan viiralle rauhassa. /20/

3.3.2 Kuidun ominaisuudet

Kuidut ovat luonnostaan onttoja putkia, joiden välillä on vähän sitoutuvaa pinta-alaa. Koska kartongin kuituverkoston rakenne kuitenkin riippuu pitkälti kuitujen luhistumistaipumuksesta, mukautumiskyvystä ja taipuisuudesta, on putkimaisia kuituja käsiteltävä ennen niiden käyttöä. /3, s. 91; 24/

Luhistuminen tarkoittaa kuitujen litistymistä massan valmistuksen aikana tai kartonkikoneella nauhamaisen muotoiseksi. Luhistuminen auttaa kuitujen välisen kontaktipinta-alan muodostumisessa ja tekee kuidusta myös luhistumatonta kuitua taipuisamman ja mukautumiskykyisemmän. Siten myös sidosten muodostuminen kuitujen välille helpottuu, jolloin syntyy tiheä ja hyvin sitoutunut kuituverkko. Koska luhistumistaipumukset ovat suurimpia ohutseinäisillä sekä vähän ligniiniä sisältävillä kuiduilla, on kemiallisesti käsitellyillä männyn kevätkuukuiduilla sekä koivukuiduilla parhaimmat sitoutumisominaisuudet. /3, s. 91; 24/

Vaikka taipuisimmat ja mukautumiskykyiset kuidut antavatkin hyvän kuitujen välisen sitoutuneisuuden ja siten hyvät lujuudet, on sillä myös negatiivisia vaikutuksia. Näitä ovat kartongeille kriittisten ominaisuuksien, kuten bulkin ja sitä kautta taivutusjäykkyyden aleneminen. /7/

3.3.3 Viiraosan z-suuntaiset jakaumat

Vaikka monikerroksisessa kartongissa kerrosten massakoostumukset kontrolloivatkin suurelta osin materiaalien z-suuntaista jakautumista, on myös

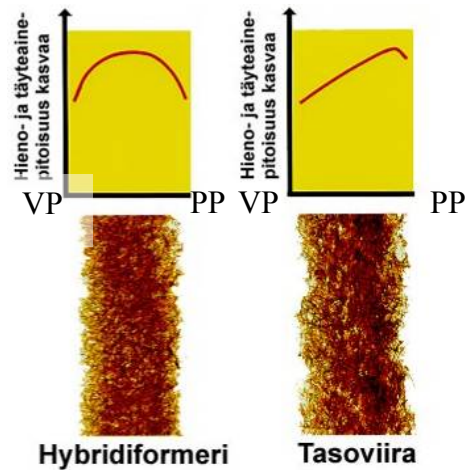
yksittäisten kerrosten paksuussuuntaisella jakautumisella suuri merkitys. Nykyisin kerrosten hienoainejakaumia ja etenkin kerrosten rajapinnoissa olevan hienoaineen määrää pidetäänkin kriittisimpänä tekijänä kerroksia liitettäessä, kun aikaisemmin on ajateltu kerrosten kuiva-ainepitoisuudella olevan eniten merkitystä.

Palstautuminen on herkkä kaikille paksuussuuntaisille epäyhdenmukaisuuksille sen tapahtuessa aina heikoimmasta tasosta. /22; 6; 7/

Hienoaineen kerroksen sisäisen palstautumislujuuden ja kerrosten välisen lujuuden parantava vaikutus perustuu sen suureen sitoutumispinta-alaan. Hienoaine toimii liiman tavoin, kun vedenpoiston edetessä viimeiset vesipisarot siirtyvät pintajännitysten voimasta kuitujen risteyskohtiin vieden hienoainetta mukanaan. /3, s. 92; 24/

Kemiallisen massan hienoaine on sitoutumiskykyisempää kuin mekaanisen massan, sillä mekaanisen massan hienoaine sisältää ligniiniä, joka vähentää sitoutuvaa pinta-alaa. Tästä huolimatta hienoaineen merkitys on suurempi mekaaniselle massalle sen muutoinkin huonompien sitoutumisominaisuuksien johdosta.

Hienoainejakaumaan vaikutetaan suurimmin kartonkikoneen viiraosalla, sillä tällöin vapaa vesi pystyy kuljettamaan hienoainetta mukanaan. Kuten kuvasta 12 huomataan, on tasoviiran hienoainejakauma voimakkaasti lineaarinen määrän pienentyessä pinnasta viiran puolelle siirryttäessä. Tällainen hienoainejakauma antaa hyvät kerroksen sisäiset lujuusominaisuudet, sillä varsinaisia heikkoja kohtia ei rainaan muodostu. Sen sijaan kerrosten väliseen sidoslujuteen tällainen jakauma ei ole paras. Koska viiran puolella on hienoaineköyhä alue, ei sen sitoutumispotentiaali ole hyvä. Tämän vuoksi erillisiä tasoviiraja käytettäessä tulisikin välttää ratkaisuja, joissa kaksi viirapuolta yhdistetään toisiinsa. Kuvasta 12 nähdään myös kuinka yläviirayksiköllä aikaansaatu kaksisuuntainen vedenpoisto aiheuttaa hienoaineköyhän alueen molempiin pintoihin. Tällöin kerrosten toisiinsa liittäminen on vieläkin haasteellisempää. /22; 9, s. 240; 6/



Kuva 12 Hybridiformerin ja tasoviiran hienoainejakaumat, PP tarkoittaa pintapuolta ja VP viirapuolta /37/

Hienoaineen määrää rainassa ja etenkin sen viirapuolella voidaan parantaa käyttämällä viiraosan alussa varovaista vedenpoistoa, jolloin hienoainetta ei huuhtoudu rainasta pois niin paljolti. Tietyiltä osin kerrosten välistä sitoutumista voidaan parantaa myös toteuttamalla rainanmuodostus suuremmassa sakeudessa, jolloin hienoaineen liikkuminen rainassa vähenee ja myös sen retentio paranee. /9, s. 240/

Mikäli kartongin valmistuksessa käytetään täyteaineita, noudattaa niiden jakautuminen tasoviiralla hienoainejakaumaa. Näiden kahden jakauman vaikutus kerrosten väliseen sitoutumiseen on kuitenkin täysin päinvastainen. Kun hienoaines on vaadittavaa riittävän sitoutumisen aikaansaamiseksi, ovat täyteaineet puolestaan haitallisia sitoutumiselle, mikä johtuu niiden taipumuksesta asettua kuitujen välille ja estää sidosten syntymistä. /9, s. 240; 14/

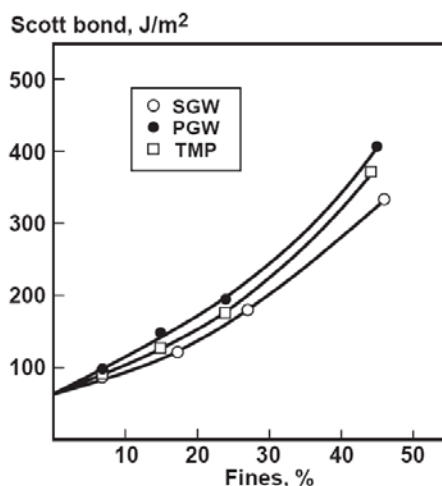
3.3.4 Jauhatus

Neitseelliset kuidut eivät sinällään ole soveltuvia kartongin valmistukseen, vaan niiden ominaisuuksia tulee muuttaa jauhamalla. Kemiallisen massan jauhatus synnyttää hienoainetta, fibrillejä kuidun pintaan sekä aikaansaa kuidun sisäistä fibrilloitumista ja lisää kuidun turpoamista. Nämä kaikki osaltaan parantavat sitoutuvuutta. On tutkittu, että sellun Shopper Riegler -arvon eli jauhatusasteen kasvattaminen hieman vajaalla 10 yksiköllä aiheuttaa palstautumislujuuden

kaksinkertaistumisen /29/. Samalla jauhatus myös nostaa kemiallisen massan kimmokerrointa, mikä kaavan 1 mukaan parantaa taivutusjäykkyyttä. /3, s. 91; 7; 34/

Mekaanisten massojen valmistusprosesseissa tärkein hallintasuure on Freeness-arvo, joka kuvaa massan suotautumisnopeutta ja kertoo osin hienoaineen määrästä jakeessa. Hienoaineen määrä on mekaanisen massan sitoutumiselle tärkeää, sillä kerroksen sisäinen lujuus on vahvasti riippuvainen tiheydestä. Ongelmana kuitenkin on, että tiheyden kasvu heikentää massan bulkkia ja tätä kautta taivutusjäykkyyttä suhteessa neliömassaan, jonka optimointi on keskikerrokseen käytettävän mekaanisen massan tärkein tehtävä. /3, s. 92, 269; 34/

Mekaanisista massoista hierre vaatii saman Scott Bond -arvon saavuttamiseksi enemmän hienoainetta kuin hioke, kuten kuvasta 13 nähdään. Hienoaineen määrän nostaminen lisää suotautumisvastusta ja siten hidastaa vedenpoistoa viiraosalla. Hiokkeen valmistuksessa liiallinen lämpötila heikentää lujuusominaisuuksia, joten monikerroskartonkien keskikerroksessa käytettäväksi soveltuvat parhaiten PGW70 ja PGW95. /5; 1; 16/

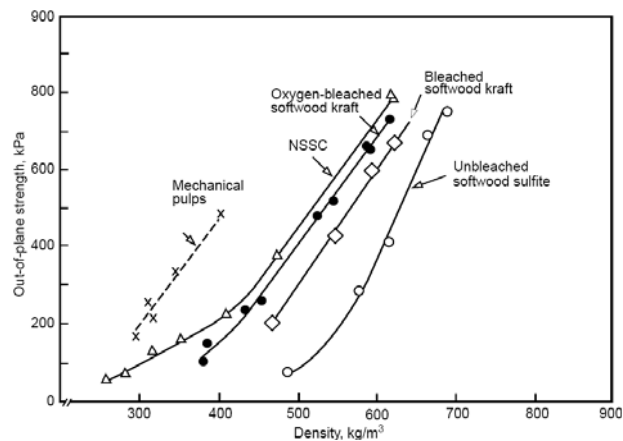


Kuva 13 Mekaanisten massojen Scott Bond -arvoja hienoaineen funktiona /1/

Nykyisin monikerroskartonkien keskikerroksissa käytetään myös CTMP-massaa sen parempien sitoutuvuusominaisuuksien takia. Prosessiin kuuluva kemiallinen esikäsittely lisää kuitujen taipuisuutta ja luhistumistaipumusta verrattuna täysin mekaanisiin massoihin sekä poistaa osan huonosti sitoutuvasta ligniinistä kuidun pinnasta. Samalla Freeness-tasolla tarkasteltuna CTMP:llä on kuitenkin täysin

mekaanisia massoja heikompi bulkki, mutta koska se voidaan paremman sitoutuvuutensa ansiosta valmistaa korkeampaan Freeness-tasoon, tämä ei ole ongelma. Kartongille käytettävän CTMP:n Freeness on luokkaa 250–500 ml ja tikkupitoisuus 0,15 %. /1; 18/

On myös tutkittu, että CTMP-massaa käytettäessä voidaan suurempi Scott Bond -arvo saavuttaa ilman bulkin menettämistä, kun ensimmäisen vaiheen jauhatus, lajittelu ja rejektijauhatus optimoidaan. Jauhatus tulisi ensimmäisessä vaiheessa toteuttaa korkeatehoisena, jolloin se lyhentää kuituja mutta antaa siitä huolimatta vielä korkean bulkin. Tämän jälkeen jakeesta tulisi lajitella sellainen osa pois, joka on sellaisenaan käyttökelpoista massaa. Tällöin vältetään tilanteelta, jossa toisessa vaiheessa katkotaan jo ominaisuuksiltaan hyviä kuituja. /34/



Kuva 14 Palstautumislujuus tiheyden funktiona eri massoilla /7/

Kuten jo aiemmin todettiin, on kerroksen sisäinen palstautumislujuus vahvasti riippuvainen sen tiheydestä (kuva 14). Lujuuksien kasvu perustuu lisääntyvään sitoutuvan pinta-alan määrään massan jauhatusta tai märkäpuristusta lisättäessä. Kuten kuvasta 14 käy ilmi, kasvaa mekaanisten massojen palstauttamiseen vaadittava voima yli kaksinkertaiseksi tiheyden kasvaessa noin 100 yksiköllä. Valkaistulla havusellulla kasvu on tätäkin suurempi, sillä samalla tiheyden nostolla saavutetaan jopa kolminkertainen palstautumislujuus. /7; 34

3.3.5 Kerrosten kosteudet liitettäessä

Erillään valmistetut kerrokset tulee yhdistää niin, että vapaata vettä on läsnä. Tällöin yhdistämisen jälkeisessä kuivatuksessa veden ja kuidun väliset sidokset pystyvät korvautumaan kuitu-kuitu sidoksilla. Yli 15 % kuiva-aineessa ei rainassa enää ole vapaata vettä, joten tätä voidaan pitää liitossakeuden ylärajana. On kuitenkin tutkittu, että mikäli toisen kerroksen kuiva-aine on noin 9 %, voi toisen kerroksen olla niinkin korkea kuin 18–20 %. Mikäli kerroksia liitettäessä vastakkain ovat toisesta kerroksesta tasoviiran hienoaineköyhä viirapuoli ja toisesta kerroksesta pintapuoli, tulisi näistä jälkimmäisen olla matalammassa kuiva-aineessa, sillä teoriassa matalamman kuiva-aineen puolelta voi siirtyä hienoainetta korkeamman kuiva-aineen puolelle. /9, s. 240; 26, s. 308/

Vaikka matalaa sakeutta molemmissa kerroksissa pidetäänkin ideaalisena, ei se saa olla liian alhainen riittävän kuivatuskapasiteetin säilyttämiseksi. /26, s. 308/

3.3.6 Muut keinot

Erillisten rainojen sisäistä palstautumislujuutta voidaan myös parantaa erilaisilla lisäaineilla. Näistä tehokkain on massatärkkelys, jonka ensisijaisena tarkoituksena on parantaa tuotteen kuivalujuutta etenkin paksuussuunnassa lisäämällä kuitujen sitoutuvuutta ja parantamalla retentiota. Massatärkkelyksistä kationisilla on todettu olevan suurempi vaikutus kuin modifioimattomilla tai anionisilla. Tärkkelystä voidaan käyttää kaikkiin kerroksiin, mutta mahdollisesti mekaanisesta massasta koostuvassa runkokerroksessa sillä on suurin merkitys. /10/

Myös alunan lisäys joko yhtä aikaa massatärkkelyksen kanssa tai sen jälkeen parantaa palstautumista sen tärkkelyksen retentiota parantavan vaikutuksen ansiosta. Paras lujuus kerrosten välillä saavutetaan pH-alueella 4,5–5,5. Retentioaineilla voidaan vaikuttaa sekä kerrosten sisäiseen että kerrosten väliseen palstautumislujuuteen. Retentioaineiden vaikutus perustuu niiden hienoaineen sitovuuteen, jolloin sitoutumiskykyisen materiaalin poistuminen rainasta pienenee. /9, s. 240; 30/

Tehokas keino kerrosten välisen sitoutuneisuuden parantamiseksi on suihkuttaa tärkkelystä tai hienoainetta sisältävää nollavettä niiden väliin ennen liittämistä. Etenkin toisen yhdistettävistä pinnoista ollessa viirapuoli tämä on lähes välttämätöntä. /22; 9, s. 241/

Joillakin konekonstruktion valinnoilla voidaan myös vaikuttaa palstautumiseen. Hydraulisen perälaatikon on tutkittu antavan jopa 30 % paremman kerroksen sisäisen palstautumislujuuden kuin reikätelaperälaatikko. Tämä johtuu aikaansaattavan kuituverkoston huopautuneemmasta rakenteesta. Myös korkeassa perälaatikkosakeudessa toteutettu rainanmuodostus auttaa parantamaan palstautumista kuitujen orientoituessa osittain pystysuunnassa. Tämä ratkaisu huonontaa kuitenkin tason suuntaisia lujuuksia sekä formaatiota, joten se ei useinkaan ole käyttökelpoinen. /9, s. 241; 12/

Puristinosalla on suuri vaikutus kerrosten välisten sidosten muodostumiseen, sillä tällöin rainat ovat jo yhdistyneet. Puristuksessa kartonkirata tiivistyy ja kuidut saavuttavat keskenään suuremman kosketuspinta-alan. Tähän alaan voidaan vaikuttaa käyttämällä mukautumiskykyisiä kuituja sekä tuomalla raina puristinosalle suhteellisen matalassa kuiva-ainepitoisuudessa. Puristettaessa kartonkia on kuitenkin varottava liian suurien vetojen, sillä kerrosten erilaiset kimmokertoimet voivat aiheuttaa niiden välille liukumaa. /9, s. 240; 7/

Pintaliimauksella on tarkoituksena yleensä sulkea kartongin pinta, mutta sitä voidaan käyttää myös palstautumislujuuden parantamiseen. Tähän tarkoitukseen paras keino on käyttää lammikkoliimapuristinta, joka ajaa liiman syvemmälle kartongin rakenteeseen kuin filmiliimapuristin. Liimana käytetyn tärkkelyksen tunkeutuessa syvälle kartongin rakenteeseen parantaa se sekä kerrosten sisäistä että kerrosten välistä palstautumislujuutta. /7; 25/

Tutkimusten mukaan karkean mekaanisen massan sitoutuvuutta voidaan parantaa otsonikäsittelyn avulla, jolloin saavutetaan erinomainen kuitujen sitoutuneisuus suhteessa bulkkiin. Tämä johtuu otsonin reagoinnista vain mekaanisten massojen kuitujen ja partikkeleiden pinnoilla olevan ligniinin kanssa, jolloin nämä kohdat saavat kyvyn sitoutua ilman, että kuidun jäykkyys muuttuu. /34/

4 KERROSTEN LIITOSKOSTEUTEEN VAIKUTTAMINEN

Kerrosten liitoskosteuksiin pystytään vaikuttamaan lähinnä viiraosan vedenpoistoelementtien toiminnalla ja perälaatikkosakeudella, vaikka vaikuttavia asioita ovat myös esimerkiksi massan lämpötila ja massakoostumus.

4.1 Tasoviiran vedenpoistoelimet

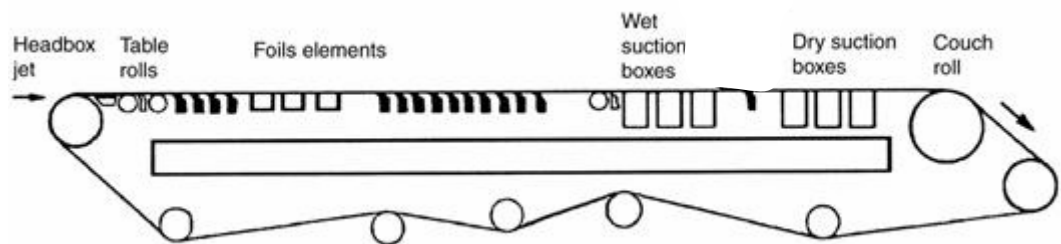
Vedenpoiston tulisi tapahtua koko viiran pituudelta varsin yhdenmukaisella tavalla, ilman, että välissä on uinuvia vyöhykkeitä tai liian äkillisiä suuren vedenpoiston kohtia. Vedenpoisto on kuitenkin jokaisella tasoviiralla yksilöllistä ja riippuu viiran rakenteen, vedenpoistoelimiä, viiran nopeuden sekä jännityksen lisäksi massan luonteesta (mm. lämpötila, sakeus, paksuus, Freeness, lisäaineet).

Vedenpoistokapasiteetti määräytyy niistä vedenpoistoelimistä, joiden kohdalla rainan sakeus ja/tai kerrospaksuus ei ole optimissaan kyseisen elimen toiminnan kannalta. /26, s. 242; 37/

Yleisenä sääntönä kuitenkin on, että massa tulisi kuivata mahdollisimman suureen kuiva-aineeseen staattisilla ja matalaimuisilla elimillä ennen suurten imuvoimien kohdistamista rainaan. Staattisilla vedenpoistoelimillä on mahdollisuus päästä paksuilla lajeilla noin 1,5–1,7 %:n sakeuteen. Koska rainan vedenpoisto on sysäyksittäistä, muodostuu rainasta suhteellisen avoin ja huokoinen, erityisesti alapinnastaan. Sysäyksittäisen vedenpoiston aiheuttama mikroturbulenssi auttaa myös huopautuneen rakenteen muodostumisessa ja pitää rainan avoimena vedenpoistolle. Hyvällä kuivatuksen kontrolloinnilla voidaan myös vaikuttaa hienoaineen poistumiseen rainan alaosaan. /26, s. 242–243; 37/

Tasoviiran vedenpoisto on tulos monien erilaisten vedenpoistoelinten toiminnasta, ja yleensä se onkin varustettu rintapöydällä, foileilla ja/tai rintatelalla, imulaatikoilla, märkäimulaatikoilla sekä imutelalla. Kuvassa 15 on esitetty yksi mahdollinen tasoviiraratkaisu. Nykyisissä koneissa vedenpoistoelimet ovat keraamisia. /3, s. 137; 2, s. 273/

Vaikka vedenpoisto tasoviiralla onkin yksilöllistä, voidaan kullekin vedenpoistoelinryhmälle antaa keskimääräiset vedenpoistomäärät perälaatikkovirtaamaan suhteutettuna. Rintapöydän alueella tästä määrästä poistetaan noin 20 % ja staattisilla foileilla noin 55 %. Tämän jälkeen perälaatikkovirtaamaan suhteutetut poistomäärät pienenevät niin, että alipaineella varustetut foililaatikot poistavat noin 15 %, tasoimulaatikot noin 7 % ja imutela enää noin 1 %:n perälaatikkovirtaaman vedestä. Puristinosalle siirryttäessä rainassa on siis jäljellä noin 2 % sen alkuperäisestä vesimäärästä. /37/



Kuva 15 Tasoviiran vedenpoistoelimet /22/

Tasoviiran ensimmäiset vedenpoistoelimet ovat rintatela ja rintapöytä. Näiden molempien tehtävänä on tukea viiraa huulisuihkun iskeytyessä siihen ja rintapöydän alueella huulisuihku myös rauhoitetaan. Rintapöydällä vettä poistetaan suspension liike-energian ja rintapöydän kannen foiliefektiä sekä listojen kaavintoimintoa hyväksi käyttäen. Rintatela voidaan myös korvata niin sanotulla ravistajatelalla, joka täristää viiraa koneen leveys suunnassa parantaen muodostuvan rainan formaatiota. Alkuvedenpoisto viiralle tullessa on kriittistä optimaalisen rainanmuodostuksen sekä hyvän retention aikaansaamiseksi. Tämän vuoksi vedenpoiston tulisikin olla tässä vaiheessa varovaista ja täysin hallittua. /9, s. 268; 3, s. 137; 17; 37/

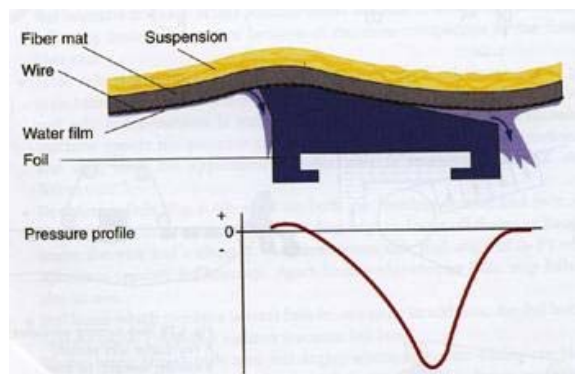
Tasoviiralle on mahdollista sijoittaa myös rekisteriteloja, mutta ne on nykyisin usein korvattu foiliratkaisuilla, sillä reikätelojen aiheuttamat painesykäykset muodostuvat jo yli 300 m/min nopeuksilla liian suuriksi, mikä huonontaa rainan muodostumista sekä lujuuksia. Foilin jättöpuolelle syntyvä painesykäys on puolestaan vain noin puolet rekisteritelan paineesta ja tätäkin pienempi, mikäli käytetään erittäin pientä päästökulmaa. Foilit vaativat myös vähemmän tilaa kuin rekisteritela saman vedenpoistokapasiteetin saavuttamiseksi. /3, s. 138; 37/

Foileissa on teräväkulmainen etureuna, joka kaapii viiran alapuolella kulkeutuvan veden pois. Kulma ei saa olla liian terävä, sillä tällöin reuna rasittaa viiraa, jonka seurauksena käyttöikä pienenee. Etureunan jälkeen foili madaltuu tasaisesti koneella eteenpäin mentäessä, josta aiheutuu alipaineinen tila vedenpoistoa varten. Kuvassa 16 on nähtävissä foilin muoto sekä paineen kehitys foilin vaikuttaessa.

/22; 3 s. 138; 2 s. 268/

Kyseisen vedenpoistoelimen loppuosaan on usein hiottu pieni päästökulma ($0-3^\circ$), joka vaikuttaa foilin vedenpoistokykyyn. Sopivalla kulmalla saadaan aikaan myös mikropyörteitä, jotka estävät kuitujen flokkaantumista ja lisäävät vedenpoistoa jo muodostuneen kuitumaton läpi. Kasvattamalla foilikulmaa viiraosan mukana saadaan optimaalisin yhdistelmä vedenpoiston ja formaation kannalta. Vedenpoisto foileja käyttämällä on eniten riippuvaista massan Freneksestä sekä viiralla olevan sulppukerroksen paksuudesta. /22; 3 s. 138; 2 s. 268; 26 s. 242/

Foileja voidaan myös sijoittaa useita yhteen yksikköön, jolloin puhutaan foililaatikosta ja se voidaan lisäksi altistaa tyhjiölle. Tällöin puhutaan vakufoililaatikosta. Näistä jälkimmäisiä käytetään, kun tavallisten staattisten foililistojen vedenpoistotehokkuus ei ole enää riittävä, mutta imulaatikoiden käyttö ei suurten vesimäärien takia ole vielä järkevää. Matalalla alipaineella suoritettu vedenpoisto on haluttua myös sen viiraan kohdistavan vähäisen kiskonnan sekä vähäisemmän viiramarkkeerauksen vuoksi. /2, s. 268; 26, s. 242; 37/



Kuva 16 Foilin toiminta ja painejakauma /2, s.270/

Viiraosalla sijaitsee usein myös kahden tyyppisiä imulaatikoita; märkäimulaatikoita ja tasoimulaatikoita. Märkäimulaatikot sijaitsevat kohdassa, jossa rainan kuiva-ainepitoisuus on alle 2 %, eikä ilmaa voida vielä imeä rainan läpi. Tasoimulaatikot

puolestaan sijaitsevat sen jälkeen, kun on saavutettu 2 %:n sakeus. Näiden vedenpoistoelinten kohdalle muodostuu vesiraja kohtaan, jossa rainan sakeus on noin 4–7 %. Tasoimulaatikot imevät puolestaan veden lisäksi myös ilmaa rainan läpi ja niiden jälkeen kuiva-aine on kasvanut 2 %:sta 10 %:iin. Tasoimulaatikoissa vallitseva alipaine on huomattavasti suurempi kuin märkäimulaatikoissa ja peräkkäisten imulaatikoiden alipaineet on muutenkin hyödyllistä porrastaa ajosuunnassa kasvaviksi. Molemmat imulaatikot koostuvat imujaloista sekä noin 50 cm leveästä laatikosta, joka on peitetty keraamisella kannella. Viiraosan lopussa sijaitsee vielä imutela, jossa on reiällinen vaippa ja paikallaan pysyvä imulaatikko. /3, s. 138; 2, s. 270; 37/

4.2 Perälaatikkosakeus

Tuotettavan kerroksen neliömassa riippuu huuliaukon läpi virtaavan massan määrästä ja sakeudesta. Jos sakeutta joudutaan laskemaan esimerkiksi huonon formaation vuoksi, tarvitaan suurempi virtaus saman neliömassan tuottamiseksi ja päinvastoin. /9, s. 262/

Perälaatikkosakeus voidaan likimäärin laskea seuraavanlaisesta yhtälöstä /22/:

$$W = Rhc \quad (5)$$

missä W on neliömassa, h huuliaukon suuruus c massan sakeus ja R on massan retentio. Kaava kuitenkin olettaa, ettei huulisuihkun ja viiran välillä ole nopeuseroa, joten se ei todellisuudessa ole kovinkaan käyttökelpoinen.

Kartongeille käytetyt perälaatikkosakeudet vaihtelevat 0,2 ja 0,5 %:n välillä. Massan pitkäkuituus vaikuttaa kuitenkin suuresti käytettävään sakeuteen, sillä suuremmalla pitkäkuituusudella vaaditaan alhaisempi sakeus saman formaation saavuttamiseksi. Luonnollisesti alhainen sakeus vaikuttaa myös koko rainanmuodostusosan jälkeiseen kuiva-ainepitoisuuteen, mikäli viiraosan vedenpoistoelinten toimintaa ei tehosteta samassa suhteessa. /9, s. 43; 3, s. 132/

5 SAKEUDEN ON-LINE MITTAAMINEN VIIRAOSALLA

Viiraosan sakeusmittauksen avulla pystytään paitsi kontrolloimaan kuiva-aineen kehitystä, myös määrittämään vedenpoistoelementtien tehokkuutta. Mittareita on saatavilla kiinteästi asennettuina sekä käsikäyttöisinä. Monikerroskartonkia valmistettaessa ensisijainen hyöty kiinteistä mittareista on kerrosten liitoskosteuksien määrittämisessä. Tämän vuoksi mittarit sijoitetaan yleisesti niin lähelle liitoskohtia kuin mahdollista. Myös käsikäyttöisiä mittalaitteita hyödynnetään liitoskosteuksien määrittämisessä, mutta liikutettavuutensa myötä näillä laitteilla on myös laajempia käyttökohteita, kuten vedenpoistoelinten toiminnan sekä koko viiraosan vedenpoistoprofiilin määrittäminen.

Sakeus itsessään on laskennallisen suure, joka perustuu hetkellisen neliöpainon määrittämiseen ja tavoitellun kuivapainon tuntemiseen. Yleisin käytössä oleva menetelmä viiraosan neliöpainon mittaamiseen on takaisinsiroava gammamittaus. Mittalaitteessa oleva matala-aktiivinen radioisotooppi (Amerikium 241) lähettää gammasäteitä, jotka yhdistetään ja suunnataan kohti mitattavaa materiaalia. Osuessaan materiaaliin säteet menettävät energiaansa ja siroavat takaisin kohti mittalaitetta, jossa oleva ilmaisin muuttaa jäljellä olevan gammaenergian valohiukkasiksi ja lopulta digitaalseksi signaaliksi. Tämä signaali on suoraan verrannollinen mitatun alueen painoon. Gammasäteilyyn perustuva mittaus on riippumaton mitattavan aineen väristä, koostumuksesta ja opasiteetista. /36/

Koska mittaustulos sisältää rainan painon lisäksi myös viiran painon, se tulee tuntea. Kudostoimittaja antaa viiran mukana tiedot kuivan, kulumattoman viiran neliöpainosta. Koska viiran painoon vaikuttaa kuitenkin viiran kulumisen lisäksi myös sen mukana kulkeva vesi, ei arvo sellaisenaan ole käyttökelpoinen. Viiran paino tulee käsimittausta suoritettaessa mitata mahdollisimman nopeasti viiran ja radan erkanemisen jälkeen, jolloin esimerkiksi korkeapainesuihkuilla ei ole vaikutusta painoon. Kartonkikoneilla radan neliöpainot ovat kuitenkin niin suuria, että viiran painossa tapahtuva pieni vaihtelu ei vaikuta niin ratkaisevasti lopputulokseen kuin paperikoneilla. /33/

Koska kartonkikoneilla retentio on usein lähellä 100 %:a, on sakeuden laskennallinen määrittäminen yksinkertaista.

Kun kaikki tarvittavat suureet tunnetaan, saadaan rainan hetkellinen sakeus määritettyä kaavan (6) avulla /33/:

$$c = \frac{K_p}{W - W_v} \times 100\% \quad (6)$$

missä c on sakeus, W_v viiran neliöpaino, K_p kerroksen kuivapaino ja W mitattu neliöpaino. Paperikoneilla määrittäminen on huomattavasti hankalampaa, sillä retentio on usein suhteellisen heikko ja siksi rainan sakeutta määritettäessä tulee huomioida myös viiraveden sakeus. /33/

Sekä käsimitausta suoritettaessa että kiinteitä mittareita asennettaessa tulee huolehtia, että anturi on tasaisesti viiraa vasten. Mittaukset tulisi myös suorittaa samasta kohdasta radan poikkisuuntaan nähden, jolloin poikkisuunnan profiilissa ilmenevät vaihtelut eivät vaikuta tulosten käyttökelpoisuuteen. Varsinainen mittauskohta niin siirrettävillä kuin kiinteilläkin mittareilla tulee valita niin, ettei mittaus huomioi mahdollisia muita elementtejä, kuten teloja. Tämän takia tyhjää tilaa anturin yläpuolella tulisikin olla noin puoli metriä ja sivusuunnassa anturin yläpuolisella alueella kummallakin puolella noin 10 cm. /33/

Kiinteitä mittareita asennettaessa tulee huomioida myös käsimittareilla tehtävät tarkastusmittaukset. Yksi käsimitaus anturi vaatii sivusuunnassa noin 8 cm tilaa mittauksen suorittamiselle ja pystysuunnassa noin 10 cm tilaa, jotta anturi saadaan oikein paikoilleen viiran alle. Tämä asettaa omat vaatimuksensa kiinteiden mittareiden asennukselle, sillä viiraosan vedenpoistoelimet ovat usein hyvin lähellä toisiaan. Kiinteiden mittalaitteiden anturin varteen olisi hyvä asentaa myös esimerkiksi vesivaaka, jolloin voidaan varmistua oikean mittausasennon saavuttamisesta. /33/

KOKEELLINEN OSA

6 KOKEELLISEN OSAN TAVOITE

Tämän työn tavoitteena oli tutkia liitossakeuksien merkitystä monikerroskartongin kerrosten väliseen palstautumiseen. Kartonkikone, jolla koeajot suoritettiin, on teoriaosassa esitetyn kuvan 4 mukainen kolmen tasoviiran yhdistelmä, jossa kerrokset kootaan taustaviiran päälle. Koneen rakenne aiheuttaa tilanteen, jossa runko ja tausta liitetään yhteen niin, että rajapintaan tulee rungon puolelta hienoaineköyhä viirapuoli. Ajoittain onkin ilmennyt näiden kerrosten väliltä tapahtuvasta halkeamisesta johtuvia ongelmia lajeilla, joissa runkokerrosta ei muodosteta kokonaisuudessaan kemiallisesta massasta. Samalla tutkittiin myös liitoskosteuden vaikutusta pinta- ja runkokerrosten väliseen sitoutumiseen. Tosin näiden kerrosten sitoutuminen on luonnostaan parempi liitettäessä kaksi hienoainerikkaampaa pintapuolta yhteen, eikä ongelmia siten ilmene yhtä herkästi.

Koeajosta saatavien tietojen avulla on koneella tarkoitus toteuttaa toinen koeajo hieman korkeammalla neliöpainolla.

7 TYÖN SUORITUS

Kokeellinen osa aloitettiin etsimällä sopivia mittausmenetelmiä koeajoa varten. Tämä tehtiin vanhoista saman lajin näytteistä, joilla koeajo myöhemmin ajettiin. Ensimmäisten mittausten tuloksena päädyttiin muuttamaan prosessia hieman koeajoa varten. Näiden muutosten vaikutusta testattiin ylimääräisestä koeajosta tehtyjen mittausten avulla ja päädyttiin tekemään varsinaisesta koeajosta mittaukset kolmella eri menetelmällä.

7.1 Työssä käytetyt palstautumislujuuden mittausmenetelmät

Ennen koeajoa tehtiin alustavia mittauksia vuoden 2007 lopulla ja vuoden 2008 alussa ajetuista kartongeista käytännöllisen mittausmenetelmän löytämiseksi. Kyseinen kartonki oli samaa lajia, jolla varsinainen koeajo myöhemmin suoritettiin. Tutkittavia menetelmiä olivat Scott Bond, z-suuntainen vetolujuus, Peeling sekä IGT.

Scott Bond -mittaus suoritettiin Huygen-palstautumislujuuslaitteella standardia TAPPI UM-403 soveltaen ja z-suuntainen vetolujuus Lorenzen & Wettren Z-lujuuslaitteella standardin SCAN-P 80:98 mukaisesti. Molemmat mainitut ominaisuudet mitattiin niin, että kartongista oli toinen pintakerroksista revitty pois. Tällöin mittaus saatiin paremmin kohdistettua kahden kerroksen väliseen liitokseen. Scott Bond -arvot mitattiin sekä poikki- että konesuuntaan kymmenen kertaa ja Z-lujuus kuusi kertaa (koska veto tapahtuu suoraan ylöspäin, ei näytteen mittaussuunnalla ole suurta merkitystä).

IGT-laitteella tehty määrittäminen puolestaan soveltaa standardia SCAN-P 63:90, joka on tarkoitettu paperin tai kartongin nukkautumislujuuden määrittämiseen. Nyt tarkoituksena oli saada kartonki halkeamaan kokonaisuudessaan, joten mittauksessa käytettiin mahdollisimman korkeaviskootista painoväriä. Määrittäminen tehtiin kartongin molemmille puolille ja molempiin suuntiin kaikkiin kolme kertaa. Peeling-määrittäykset suoritettiin Alwetron TCT-5 -laitteella kulman ollessa 125°. Kaikki käytetyt näytteet ilmastoitiin ennen mittausten suorittamista soveltaen standardia ISO 187.

Koska näissä mittauksissa ei kartonkia saatu halkeamaan rungon ja taustan väliltä, vaan halkeaminen tapahtui aina kokonaisuudessaan rungon sisältä, päätettiin varsinaisen koeajon ajaksi jättää joitakin prosessiin olennaisesti kuuluvia tekijöitä pois. Myös pinta- ja runkokerrosten välinen halkeaminen tapahtui Scott Bond- ja Z-lujuusmittauksissa osittain rungon sisältä, mutta nämä kaksi kerrosta saatiin kuitenkin jossain määrin irtoamaan toisistaan IGT-palstautumisnopeusmenetelmällä. Pintakerros saatiin irtoamaan osittain myös peeling-määrittämyksen avulla, kun nopeus oli riittävän alhainen.

Koneella ajettiin 4.2.2008 ylimääräinen näyte, jossa mainitut prosessiin kuuluvat tekijät oli jätetty pois, ja tästä näytteestä tehtiin molemmin puolin samat mittaukset kuin edellä. Näissä mittauksissa päädyttiin tilanteeseen, jossa Scott Bond- ja Z-lujuus menetelmällä tausta irtosi siististi ja puhtaasti rungosta, kuten oli odotettua. Pinnan ja rungon välisissä mittauksissa ei sen sijaan saatu IGT-menetelmällä yhtä selkeitä tuloksia kuin aiemmin tehdyissä määrityksissä, vaikka käytettiin painatusnopeutta 7 m/s, kun se aiemmin oli ollut 5 m/s.

Lopulta tultiin kuitenkin ratkaisuun, jossa varsinaisesta koeajosta saatavista näytteistä mitataan Scott Bond, Z-lujuus sekä IGT-palstautumisnopeus. Kyseisiin menetelmiin päädyttiin, koska kahdella ensimmäisellä menetelmällä saatiin tausta ja runko irtoamaan toisistaan helposti ylimääräisissä, 4.2.2008 ajetuissa, näytteissä, joissa prosessiolosuhteet vastasivat tulevia koeajon olosuhteita. Tätä aiemmin suoritetuissa mittauksissa puolestaan oli IGT-laitteella saatu kohtalaisia tuloksia pinnan ja rungon välisestä halkeamisesta. Vaikka jälkimmäisissä määrityksissä IGT:llä ei juuri saatukaan tuloksia, on syytä uskoa, että liitoksen ollessa riittävän heikko, irtoaa pinta rungosta ja näin ollen koepisteiden välille on mahdollista saada eroavaisuuksia.

Peeling-mittaus hylättiin, sillä se kertoo ainoastaan kerrosten irrottamiseen vaadittavan suurimman voiman määrättyllä matkalla. Tällainen mittaus on herkkä kaikille epäyhdenmukaisuuksille eikä siksi ole käyttökelpoinen.

7.2 Liitossakeuskoeajo

Koeajo toteutettiin 19.2.–20.2.2008 lajilla, jossa runkokerros ei muodostu kokonaisuudessaan kemiallisesta massasta. Koeajosuunnitelma ja toteutuneet liitossakeudet ovat nähtävissä taulukoissa 2 ja 3. Alkuperäisen suunnitelman mukaan olisi rungon sakeus tullut asettaa vieläkin alemmas, mutta nämä pisteet jätettiin lopulta pois, sillä jo 10,4 %:n sakeudella alkoi radassa näkyä liikehdintää viira- ja puristinosan välisen vapaan vedon aikana ja alemmalla sakeudella rata olisi saattanut katketa. Kerrosten sakeuksien mittaamisen yhteydessä mitattiin kuitenkin muutamasta pisteestä myös viiraosan jälkeinen kokonaissakeus eikä

kerrosten liitossakeuksien muuttamisella näyttänyt olevan tähän juurikaan vaikutusta.

Taulukko 2 Koeajoon suunnitellut kerrosten sakeudet

	Pinta (%)	runko (%)	tausta (%)
1.	Ref	Ref	Ref
2.	6,5	10,4	2,5
3.	8,4	11,6	4,1
4.	10,3	12,8	5,7
5.	6,5	12,8	2,5
6.	6,5	11,6	2,5
7.	10,3	11,6	5,7
8.	10,3	10,4	5,7
9.	8,4	10,4	4,1

Taulukko 3 Koeajossa toteutuneet kerrosten sakeudet

	Pinta (%)	runko (%)	tausta (%)	pinta+runko (%)
1.	7,4	11,6	4,5	10,1
2.	6,7	10,4	2,7	9,1
3.	8,5	11,7	3,6	10,6
4.	10,1	12,2	4,7	11,6
5.	6,7	12,2	2,7	10,0
6.	6,7	11,7	2,7	9,8
7.	10,1	11,7	4,7	11,2
8.	10,1	10,4	4,7	10,3
9.	8,5	10,4	3,6	9,8

Sakeuksien muutokset toteutettiin tausta- ja pintakerroksilla tasoimulaatikoiden alipaineita sekä perälaatikon huuliaukkoa muuttamalla. Runkokerroksella jouduttiin haluttuihin sakeuksiin pääsemiseksi muuttamaan myös muiden vedenpoistoelinten alipaineita. Sen sijaan niiden vedenpoistoelinten alipaineet pidettiin koko koeajon samoina, jotka sijaitsevat kohdissa, joissa eri kerroksia on jo yhdistetty. Suunnitelman mukaisiin kerrosten sakeuksiin pääseminen osoittautui odotettua haastavammaksi, sillä oli hankala arvioida millaiset muutokset vedenpoistoelinten imuissa ja perälaatikkosakeuksissa aiheuttavat millaisenkin muutoksen sakeudessa. Tämän vuoksi koeajossa saavutetut sakeudet eroavat jonkin verran alkuperäisestä suunnitelmasta.

Kuten taulukosta 3 voidaan huomata, ovat molempien pintojen sakeudet keskikerroksen sakeutta alhaisempia. Tämä on mahdollista, sillä huomattavasti ohuemmilla pintakerroksilla ei ole yhtä suurta vaikutusta koko viiraosan jälkeiseen sakeuteen ja siten puristin- ja kuivatusosan vedenpoistokapasiteetin riittävyteen

kuin keskikerroksella. Pintakerrosten alhaisemmalla sakeudella voidaan lisäksi saavuttaa helpommin vaadittu sileytaso. Kokeellisen osan alussa myös todettiin, että runko- ja taustakerroksia liitettäessä tulee rajapintaan runkokerroksen puolelta hienoaineköyhä viirapuoli. Koska teoriassa on mahdollista, että matalamman sakeuden kerroksesta voi siirtyä hienoainetta korkeamman sakeuden kerrokseen veden mukana, on taustakerroksen ajaminen runkokerrosta matalammassa sakeudessa tästäkin syystä edullista. Todellisuudessa on kuitenkin epätodennäköistä, että näin tapahtuisi monikerroskartonkikoneille tyypillisellä, kuvan 4 mukaisella, viiraosan konstruktioilla. Tällaisessa ratkaisussa rungon ja taustan yhdistymisen jälkeinen vedenpoisto tapahtuu kokonaisuudessaan alaspäin.

Koska taustaviiran sakeutta ei pystytty mittaamaan juuri ennen liitosta liian lähellä olevan telan vuoksi, ovat mitatut sakeudet ennen viimeistä liitoskohtaa edeltävää vedenpoistoelintä. Tämän vuoksi varsinainen liitossakeus on arviolta noin 1–1,5 % korkeampi kuin mitattu sakeus. Muilla viiraosilla sakeus mitattiin kaikkien vedenpoistoelimien jälkeen. Taustan ja rungon välisessä liitoksessa myöskään rungon puoleinen sakeus ei vastaa mitattua arvoa, sillä pinta- ja runkokerrokset liitetään yhteen ennen taustan liittymistä.

Se, että pinnan sakeus on kaikissa pisteissä rungon sakeutta alhaisempi, tarkoittaa, että myös yhdistettyjen kerrosten kokonaissakeus on alhaisempi kuin rungon sakeus yksinään. Taulukossa 3 on esitetty laskennallisesti saadut yhdistettyjen pinta- ja runkokerrosten sakeudet eri pisteissä. Näiden kerrosten yhdistymisen jälkeen, mutta ennen taustan liittymistä, sijaitsee kuitenkin vielä yksi vedenpoistoelin, joka tasoittaa koepisteiden välisiä eroja. Alipaineen pysyessä vakiona on vedenpoisto luonnollisesti suurempaa tämän elimen kohdalla pisteissä, joissa pinta- ja runkokerrosten yhteissakeus on alhaisempi. Siten rungon ja taustan välisessä liitoksessa rungon puoleinen sakeus ei ole suoraan verrattavissa mitattuun tulokseen, vaan erot koepisteiden välillä ovat todellisuudessa pienempiä.

Koeajon aikana kerrosten sakeudet mitattiin käsimitarilla kudostoimittajan toimesta. Mittalaitteen toimintaperiaate on esitetty luvussa 5. Mittaukset suoritettiin vain neljästä ensimmäisestä koepisteestä, joiden aikana saatiin kaikki eri kerroksille suunnitellut sakeudet käytyä kertaalleen läpi. Muissa pisteissä sakeudet asetettiin säätämällä vedenpoistoelimien imut ja perälaatikoiden huuliaukot

samoihin arvoihin kuin siinä aiemmin mitatussa pisteessä, jossa kyseisen kerroksen sakeus oli esiintynyt. Neljän ensimmäisen koepisteen jälkeen sakeudet eivät siinä enää muuttuneet, vaan eri kerrosten sakeuksia vain yhdisteltiin erilaisiksi kombinaatioiksi.

Käsitteellisesti NDC-mittarilla pystyy mittaamaan korkeintaan noin metrin päästä laidasta. Tämän vuoksi mittaus täytyykin tehdä runkoviiran etulaidassa olevalla, muusta rainasta eroavalla alueella. Tällä alueella runkokerroksen sakeus on hieman matalampi kuin muualla rainassa. Koeajon aikana ajetuista konerullista otettiin noin 30 cm leveät näytteet. Nämä näytteet pyrittiin ottamaan samasta kohdasta, missä sakeus mitattiin. Koska ei voida kuitenkaan olla täysin varmoja siitä, onko näyte kokonaisuudessaan vai vain osittain tuolta runkoviiran etureunan poikkeavalta alueelta, saattaa tämä aiheuttaa hajontaa mittaustuloksiin. Näistä näytteistä suoritettiin valitut mittaukset luvussa 7.1 esitetyllä tavalla.

8 LIITTOSSAKEUSKOEAJON TULOKSET

8.1 Pinnan ja rungon välinen palstautuminen

8.1.1 Z-suuntainen vetolujuus ja Scott Bond

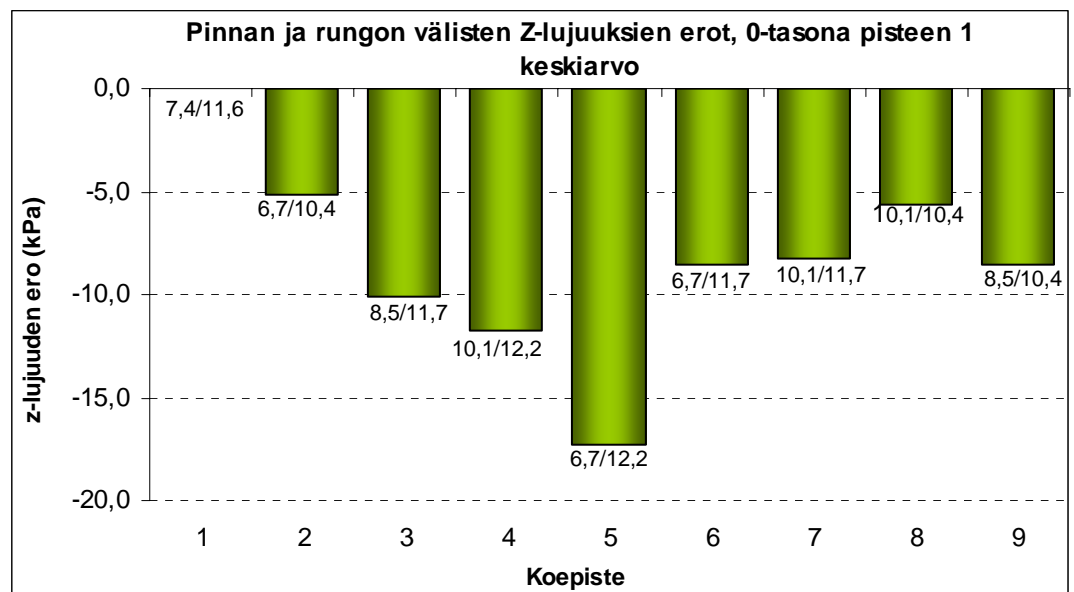
Scott Bond- ja Z-lujuusmittauksilla pinnan ja rungon välisen palstautumisen tutkiminen on vaikeaa, sillä halkeaminen tapahtuu pääasiassa rungon sisältä (liite 6). Tästä syystä voidaan olettaa mitattujen arvojen kertovan enemmän rungon sisäisestä kuin kerrosten välisestä lujuudesta. Siksi tuloksia on tarkasteltava halkeamakohta huomioiden. Halkeamakohtaa on arvioitu molemmissa mittausmenetelmissä taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4 Halkeamakohtien arviointi

0 = halkeaminen puhtaasti kerrosten väliltä
1 = halkeaminen pääasiassa kerrosten väliltä, osittain kuitenkin myös rungon sisältä
2 = halkeaminen pääasiassa rungon sisältä, osittain kuitenkin myös kerrosten väliltä
3 = halkeaminen kokonaisuudessaan rungon sisältä

Z-lujuusmittausten perusteella näyttäisi siltä (kuva 17), että piste 1 antaa z-lujuusmittauksissa parhaan tuloksen. Pisteiden 1 ja 2 välillä ei kuitenkaan 95 % luotettavuustasolla tehdyn t-testin mukaan ole tilastollisesti merkitsevää eroa. Sen sijaan muihin pisteisiin nähden ero on tilastollisesti merkittävä. Myös pisteellä 2 on tilastollisesti merkitsevää eroa pisteisiin 3, 4 ja 5 nähden. Kuvaajasta nähdään myös, että korkean rungon sakeuden pisteet 4 ja 5 saavat koesarjan heikoimmat arvot, mikä onkin odotettua, sillä sakeuden noustessa vähenee sidosten muodostumiselle välttämättömän vapaan veden määrä. Kaikki z-suuntaisten vetolujuusmittausten tulokset ovat nähtävissä liitteessä 1 ja 95 % luottamustasolla tehdyn t-testin tulokset liitteessä 2.

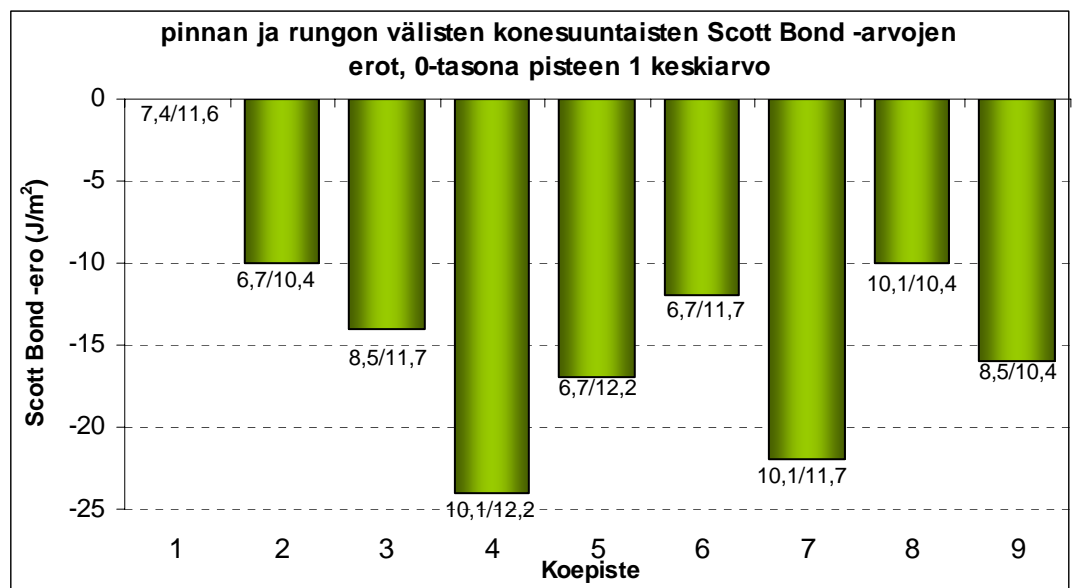
Kaikkiin tässä työssä tehtyihin t-testeihin on käytetty Microsoft Excel -ohjelmaa olettaen varianssit yhtä suuriksi. Testin antamista tuloksista on käytetty kaksisuuntaisen t-testin arvoja, jolloin testataan nimenomaan pisteiden välillä olevaa eroa, ei sitä, onko toinen suurempi kuin toinen.



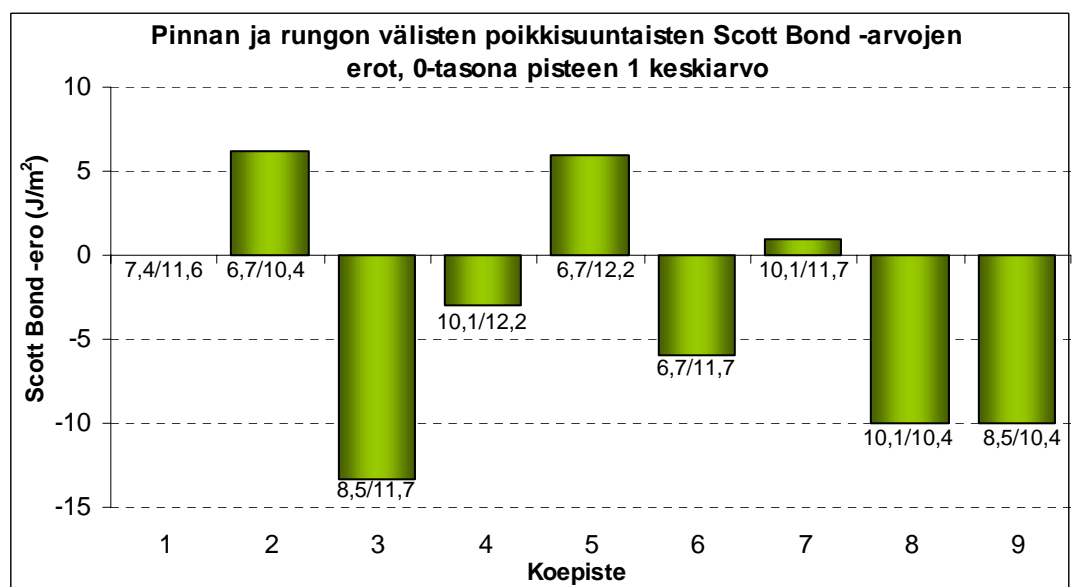
Kuva 17 Pinnan ja rungon välisten Z-lujuuksien erot pisteen 1 keskiarvoon nähden, pylvään alle merkitty pinnan sakeus/rungon sakeus

Toisin kuin z-suuntaisilla vetolujuusmittauksilla, ovat Scott Bond -menetelmällä suoritettujen mittausten hajonnat huomattavan suuria. Kone- ja poikkisuuntaisten mittausten keskiarvojen erot pisteen 1 keskiarvoon ovat nähtävissä kuvissa 18 ja 19. Vaikka kuvan 18 mukaan konesuuntaisilla Scott Bond -arvoilla näyttäisikin olevan kohtalaisen suuria eroja, ei referenssipiste 1 eroa 95 % luottamustasolla

tehdyn t-testin mukaan kuin pisteistä 4 ja 7. Kun puolestaan tarkastellaan pinnan ja rungon välisten poikkisuuntaisten Scott Bond-mittausten eroja, ei niitä näyttäisi olevan pisteiden välillä lainkaan. Samaan tulokseen päädytään myös, mikäli tarkastellaan yhdistettyjä kone- ja poikkisuuntaisia mittauksia. Tällöin yli 90 % luotettavuudella voidaan sanoa kuitenkin pisteillä 4 ja 9 olevan eroa referenssipisteeseen. Kaikki Scott Bond -mittausten tulokset ovat nähtävissä liitteessä 3 ja t-testin tulokset liitteessä 4.



Kuva 18 Pinnan ja rungon välisten konesuuntaisten Scott Bond -arvojen erot pisteen 1 keskiarvoon nähden, pylvään alle merkitty pinnan sakeus/rungon sakeus



Kuva 19 Pinnan ja rungon välisten poikkisuuntaisten Scott Bond -arvojen erot pisteen 1 keskiarvoon nähden, pylvään alle merkitty pinnan sakeus/rungon sakeus

Tulosten epäluotettavuuden vuoksi Scott Bond -mittausten antamista arvoista ei varsinaisesti voida tehdä johtopäätöksiä, mutta näytteiden halkeamakohdat osoittavat selvästi, kuinka rungon sakeus vaikuttaa sen määräytymiseen (taulukko 5). Näiden tulosten perusteella rungon sakeudella näyttäisi olevan suurin merkitys halkeamakohdan sijaintiin, sillä kuten taulukosta 5 nähdään, saavutetaan alimmalla rungon sakeudella (10,4 %) kokonaisuudessaan eniten tuloksia, joissa halkeaminen tapahtuu täysin rungon sisältä (moodi 3). Olisikin ollut mielenkiintoista nähdä, millaisia tuloksia alkuperäisen koeajosuunnitelman mukaisella vielä alhaisemmalla sakeudella olisi saatu.

Vastaavasti korkeimmalla rungon sakeudella (12,2 %) halkeaminen tapahtui selkeästi useammin osittain kerrosten väliltä (moodi 2). Kolmas käytetty rungon sakeus eli 11,7 % asettuu halkeamien osalta näiden kahden välille. Tämän rungon sakeuden omaavien pisteiden välillä on myös nähtävissä eniten hajontaa halkeamakohdassa. On myös mahdollista, että mikäli näyte halkeilee mittauksen aikana useammasta kohdasta tai halkeamakohta vaeltelee näytteen paksuussuunnassa, on saatu Scott Bond -arvo suurempi kuin halkeamiseen todellisuudessa vaaditaan.

Taulukko 5 Halkeamakohtien moodit pinnan ja rungon välisissä z-lujuus- ja Scott Bond -mittauksissa, moodi 2 tarkoittaa halkeamista pääasiassa rungon sisältä, mutta osittain myös kerrosten väliltä ja moodi 3 halkeamista täysin rungon sisältä

	Pinnan sakeus/ rungon sakeus (%)	z-lujuus (halk. moodi)	Scott Bond (halk. moodi)	
			konesuuntaan	poikkisuuntaan
1	7,4/11,6	3	3	3
2	6,7/10,4	3	3	3
3	8,5/11,7	3	3	3
4	10,1/12,2	2	2	3
5	6,7/12,2	3	2	2
6	6,7/11,7	3	2	3
7	10,1/11,7	3	2	2
8	10,1/10,4	3	2	3
9	8,5/10,4	3	3	3

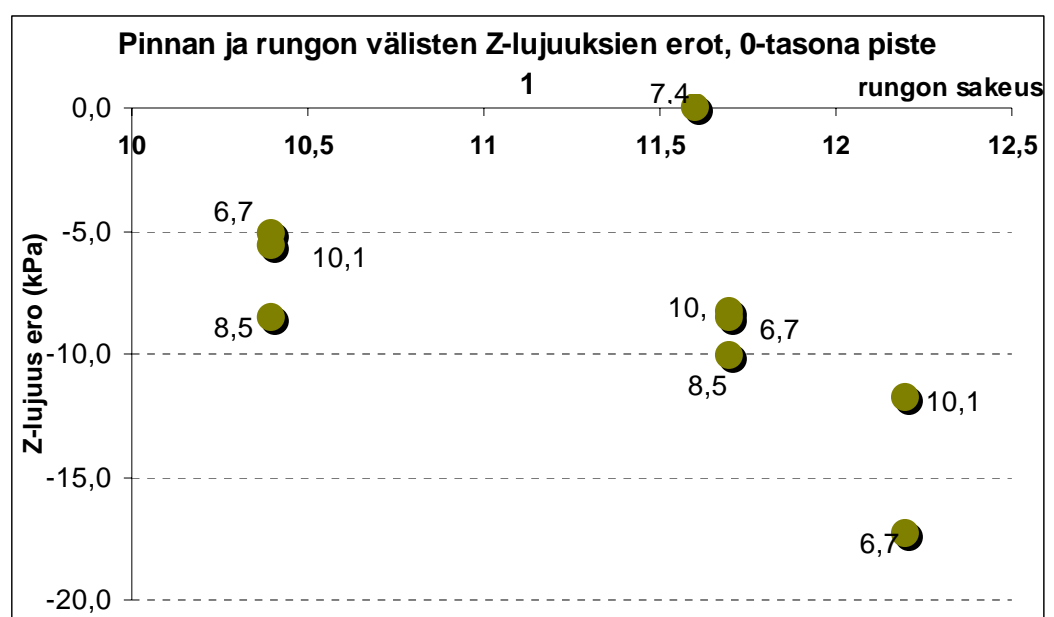
Tutkittaessa kahden alimman rungon sakeuden pisteiden halkeamia ja z-suuntaisia vetolujuusarvoja, huomataan, että rungon sakeudella 10,4 % on pisteellä 2 (pinnan sakeus 6,7 %) korkein Z-lujuus arvo ja halkeaminen tapahtuu rungosta. Myös pisteessä 9, jossa pinnan sakeus on 8,5 % tapahtuu halkeaminen rungon sisältä,

mutta z-suuntainen lujuusarvo on kuitenkin selvästi alhaisempi. Pisteitä 1, 3, 6 ja 7 tarkasteltaessa huomataan halkeamisen tapahtuvan enimmäkseen rungon sisältä sen sijaan ainoastaan pisteillä 1 ja 3, joissa pinnan sakeudet ovat 8,5 % ja 7,4 %.

Alimmalla mahdollisella pinnan sakeudella ei tässä tapauksessa saavutetakaan siis halkeamien perusteella parasta kerrosten välistä sitoutumista. Kuten aiemmin jo todettiin, piste 1 on z-suuntaiselta vetolujuusarvoltaan pistettä 2 lukuun ottamatta muita suurempi.

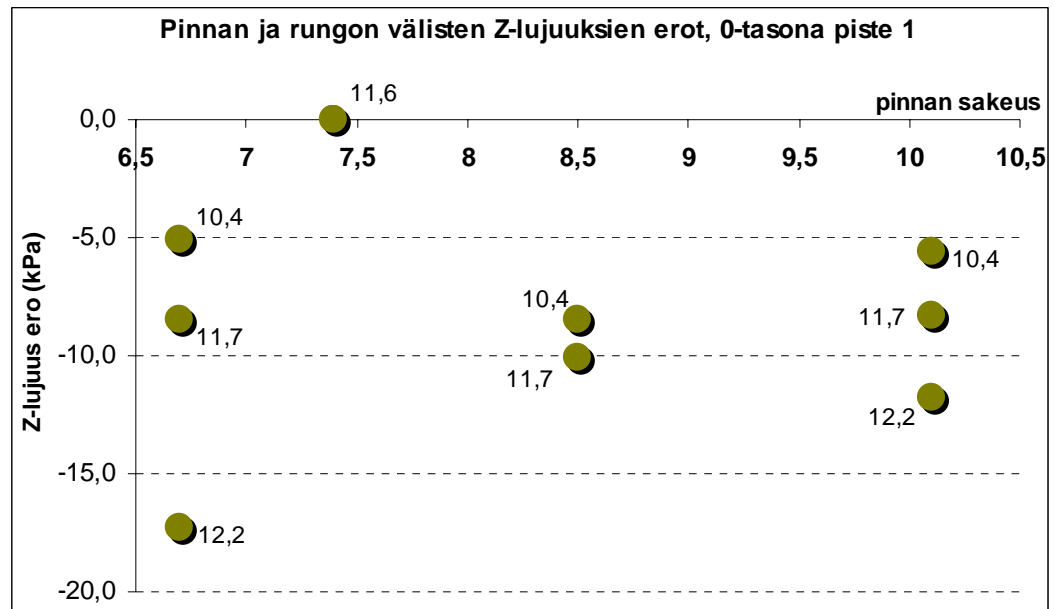
Halkeamakohtien ja Z-lujuusarvojen perusteella voidaan siis todeta pisteiden 1 ja 2 antavan tämän koeajon pisteistä parhaat kerrosten väliset sitoutumiset. Näillä pisteillä onkin yhdistävä tekijä, sillä molemmissa tapauksissa pintakerroksen sakeus on ollut noin 64 % runkokerroksen sakeudesta.

Kuten kuvista 20 ja 21 kuitenkin huomataan, näyttäisi yleisesti rungon sakeus olevan pinnan sakeutta määräävämpi tekijä z-suuntaisen vetolujuuden muodostumiselle. Matalan rungon sakeuden pisteet asettuvat ryhmänä selkeästi muita korkeammalle tasolle. Mikäli 0-pisteenä toimiva referenssipiste jätetään huomioimatta, saadaan rungon sakeuden ja z-suuntaisen vetolujuuden välille korrelaatiokertoimeksi 0,60. Rungon sakeuden ja konesuuntaisten Scott Bond -arvojen välinen korrelaatiokerroin on tällöin puolestaan 0,42. Näitä korrelaatioita ei voida vielä pitää merkitsevinä, mutta kuitenkin suuntaa-antavina.



Kuva 20 Pinnan ja rungon välisten z-lujuuksien erot pisteen 1 keskiarvoon nähden rungon sakeuden funktiona, pinnan sakeus merkitty pisteen viereen

Täytyy kuitenkin myös muistaa, että halkeaminen tapahtuu näissä mittauksissa liki kokonaan rungon sisältä ja siksi arvot kertovatkin enemmän rungon sisäisestä palstautumislujuudesta. Tätä käsitystä tukee myös kuva 21, josta on selvästi nähtävissä, ettei pinnan sakeuden kehityksellä ole selkeää yhteyttä z-suuntaisiin vetolujuusarvoihin.

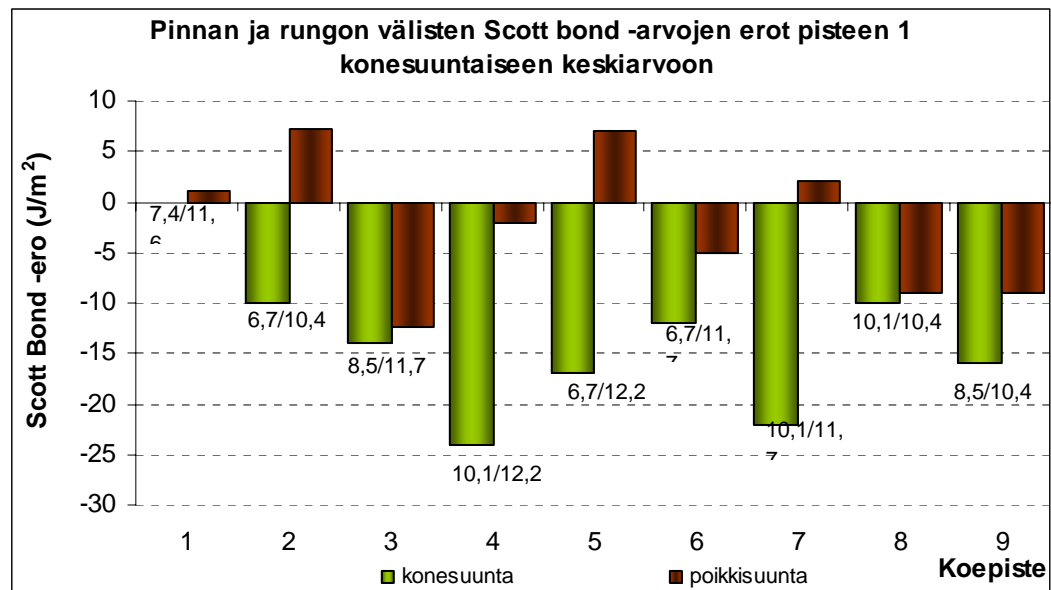


Kuva 21 Pinnan ja rungon välisten Z-lujuuksien erot pisteen 1 keskiarvoon nähden pinnan sakeuden funktiona. Rungon sakeus merkitty pisteen viereen.

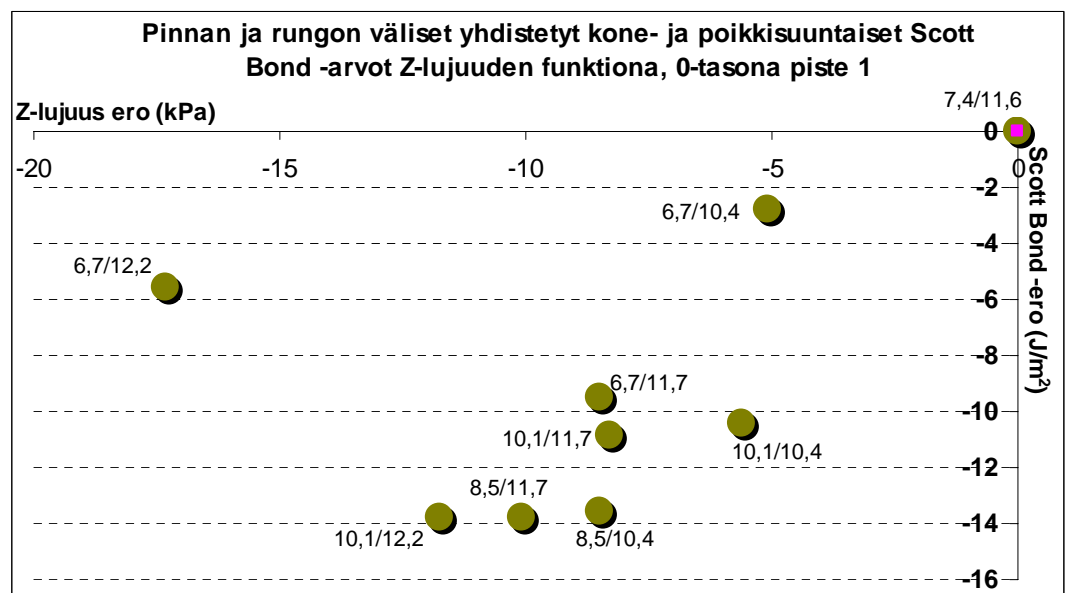
Kuten kuvasta 22 nähdään, poikkisuuntaiset Scott Bond -arvot ovat kauttaaltaan konesuuntaisia suurempia. Konesuuntaisissa mittauksissa halkeaminen näyttäisi tapahtuvan myös useammin osittain kerrosten väliltä kuin poikkisuuntaisissa mittauksissa, kuten taulukosta 5 voidaan nähdä. Taulukosta voidaan myös nähdä, että osittainen kerrosten väliltä halkeaminen näyttäisi tapahtuvan yleisesti helpommin Scott Bond - kuin z-suuntaisella vetolujuusmittauksella. Tämä johtuu luultavimmin menetelmien erilaisesta luonteesta, sillä kuten aiemmin on todettu, kohdistavat menetelmät näytteeseen erisuuntaiset voimat.

Z-suuntaisen vetolujuusmittauksen ja Scott Bond -mittauksen arvojen tulisi kuitenkin korreloida hyvin keskenään, sillä koeajon aikana ei tehty muutoksia neliöpainoon. Kuvasta 23 onkin nähtävissä yhdistettyjen kone- ja poikkisuuntaisten Scott Bond -arvojen korreloivan kohtuullisesti Z-lujuuden kanssa. Mikäli piste 5, jossa sakeudet ovat 6,7 % ja 12,2 % jätetään huomioimatta, saadaan Scott Bond- ja

Z-lujuusarvojen väliseksi korrelaatioksi 0,81, jota voidaan pitää kohtalaisena korrelaationa.



Kuva 22 Kone- ja poikkisuuntaisten Scott Bond -keskiarvojen erot pisteen 1 konesuuntaiseen keskiarvoon, pylväiden alle merkitty pinnan sakeus/rungon sakeus

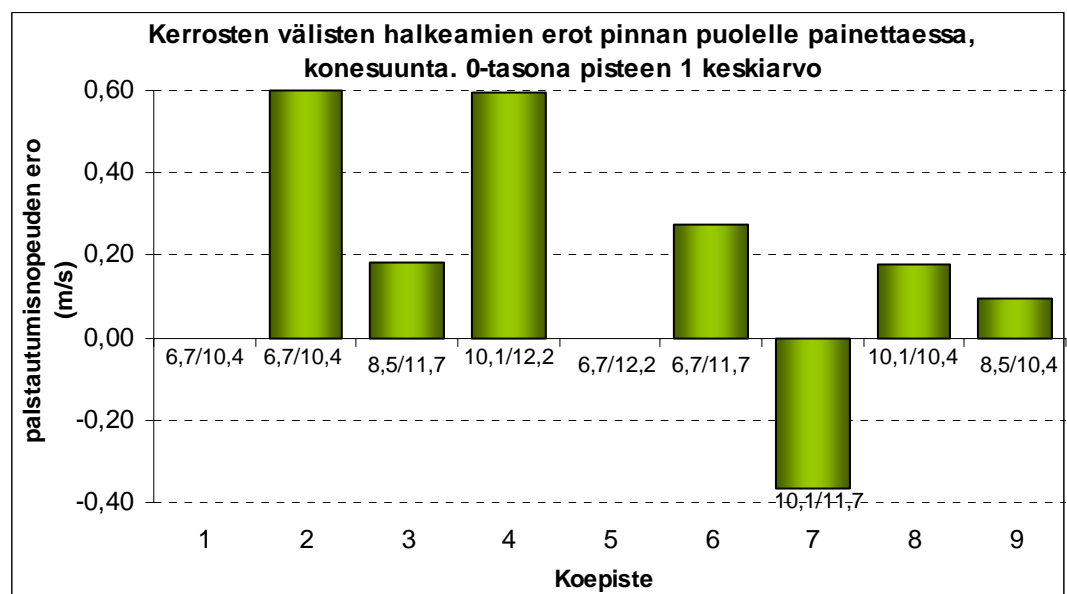


Kuva 23 Yhdistettyjen kone- ja poikkisuuntaisten Scott Bond -arvojen erot Z-lujuuden erojen funktiona, 0-tasolla pisteen 1 keskiarvot. Kunkin pisteen viereen merkitty pinnan sakeus/rungon sakeus

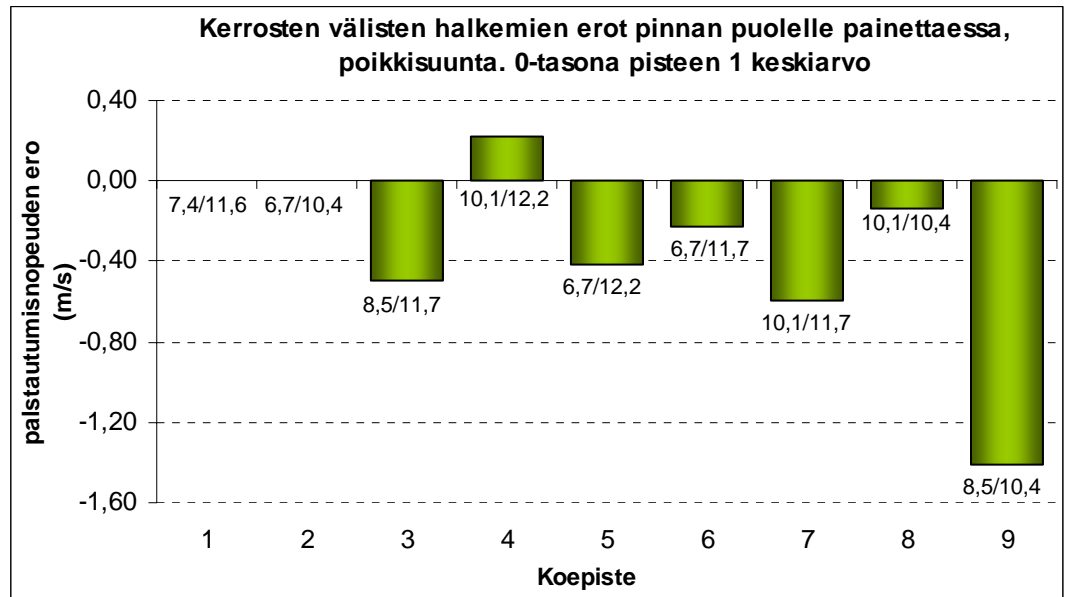
8.1.2 IGT-palstautumisnopeus

Z-suuntaisten vetolujuus ja Scott Bond -mittausten lisäksi koepisteistä mitattiin myös IGT-palstautumisnopeudet. Koska pinnan puolelle painettaessa näytteiden kupruilu on vähäistä korkean hienoainemäärän aiheuttavan hyvän kerrosten välisen sitoutuneisuuden johdosta eikä palstautumisen voida varmuudella todeta tapahtuvan kerrosten välistä, on tässä tapauksessa parempi tutkia näytteiden repeämiseen vaadittuja palstautumisnopeuksia. Kupruilun tulisi näkyä kartongin pinnalla selvästi painatussuuntaan vastaan poikkisuuntaisina kupruina, mikäli tätä haluttaisiin käyttää palstautumisen mittana. Tällaisessa tapauksessa kuprun kohdalla on selvästi nähtävissä pintakerroksen irtoaminen muusta kartongista. Esimerkki selvästä kupruilusta on liitteen 7 taustapuolelle painetuissa näytteissä.

Konesuuntaisiin kerrosten välisiin repeytymisiin vaaditut palstautumisnopeuksien erot pisteen 1 palstautumisnopeuteen nähden on esitetty kuvassa 24 ja poikkisuuntaisiin repeytymisiin vaaditut nopeuksien erot kuvassa 25. Kuten näistä kuvista nähdään, on pisteillä 2, 4, 6 ja 8 tasaisesti korkeat kerrosten väliseen repeytymiseen vaadittavat palstautumisnopeudet molempiin suuntiin. Kaikki IGT-mittausten erot pisteen 1 keskiarvoihin nähden on esitetty liitteessä 5.



Kuva 24 Kerrosten väliseen konesuuntaiseen repeytymiseen vaadittujen IGT-palstautumisnopeuksien erot pisteen 1 nopeuteen nähden pinnan puolelle painettaessa, pylvään alle merkitty pinnan sakeus/rungon sakeus

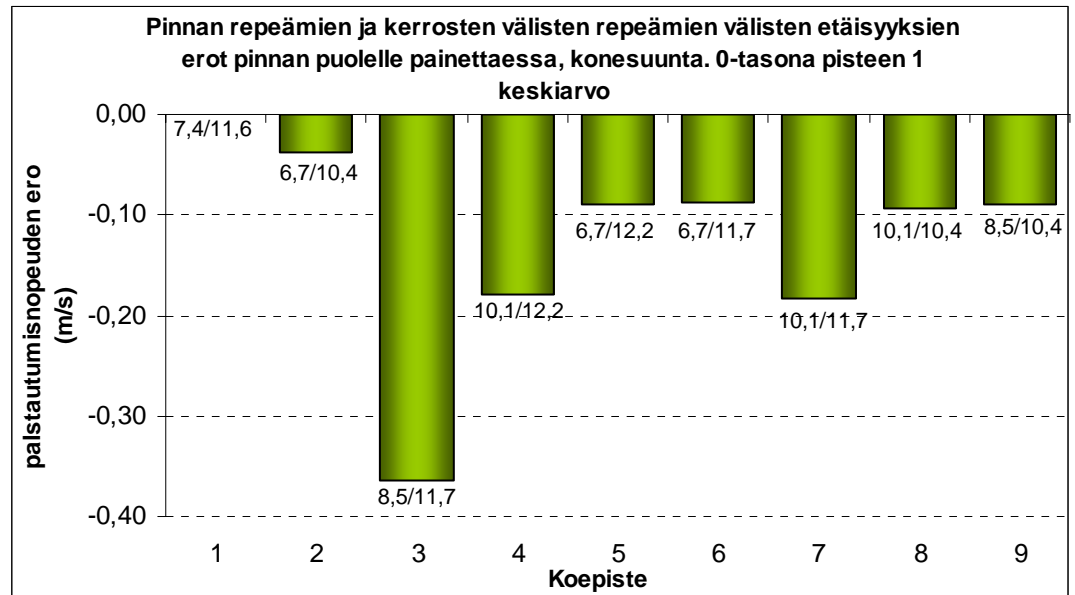


Kuva 25 Kerrosten väliseen poikkisuuntaiseen repeytymiseen vaadittujen IGT-palstautumisnopeuksien erot pisteen 1 nopeuteen nähden pinnan puolelle painettaessa, pylvään alle merkitty pinnan sakeus/rungon sakeus

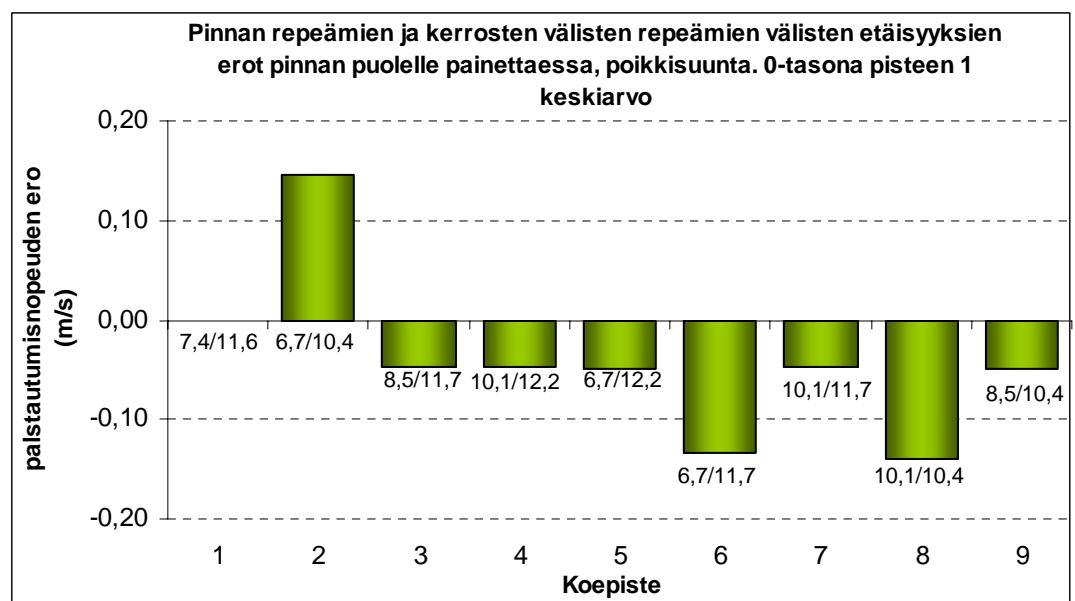
Tuloksiin tällaisenaan vaikuttaa suuresti myös pintakerroksen sisäiseen repeytymiseen vaadittava palstautumisnopeus mittausten luonteen vuoksi (pinnan on revettävä ennen kuin repeytyminen kerrosten väliltä on mahdollista tapahtua). Tästä syystä onkin mielekkäämpää verrata pinnan repeytymiseen ja kerrosten väliseen repeytymiseen vaadittavien nopeuksien eroja. Täten saadaan parempi kuva siitä, mitä vaaditaan kerrosten väliseen palstautumiseen, kun pintakerros on jo rikkoutunut. Nämä tulokset ovat puolestaan nähtävissä kuvissa 26 ja 27. Tuloksia tulkittaessa on tarkasteltava kuitenkin myös varsinaisia mittaustuloksia. Näistä tuloksista nähdään, että kaikki näytteet eivät välttämättä ole repeytyneet kerrosten väliltä, vaikka pinta olisikin rikkoutunut. Tällaisia näytteitä sisältävien koepisteiden arvojen voidaankin olettaa olevan todellisuudessa korkeampia kuin kuvista 26 ja 27 on luettavissa. Liitteessä 7 on nähtävillä esimerkki näytteestä, joka repeytyi kerrosten väliltä, ja näytteestä, joka näin ei tehnyt.

Konesuuntaisissa mittauksissa pisteet näyttäisivät käyttäytyvän suhteellisen tasaisesti lukuun ottamatta pistettä 3, jossa kahden näytteen repeytymisten välinen erotus oli nolla. Sen sijaan pisteen 2 kerrosten väliseen repeytymiseen vaadittava palstautumisnopeus on todellisuudessa korkeampi, sillä näytteistä yksi repeytyi

pinnasta suhteellisen aikaisessa vaiheessa, mutta ei lainkaan kerrosten väliltä. Samoin tapahtui poikkisuuntaisista näytteistä pisteen 1 kohdalla. Verrattaessa poikkisuuntaisia mittauksia konesuuntaisiin, huomataan pisteessä 3 tapahtuvan suurin muutos.



Kuva 26 Konesuuntaisiin pinnan repeytymisiin ja kerrosten välisiin repeämisiin vaadittavien IGT-palstautumisnopeuksien erotuksien erot pisteeseen 1 nähden pinnan puolelle painettaessa



Kuva 27 Poikkisuuntaisiin pinnan repeytymisiin ja kerrosten välisiin repeämisiin vaadittavien IGT-palstautumisnopeuksien erotuksien erot pisteeseen 1 nähden pinnan puolelle painettaessa

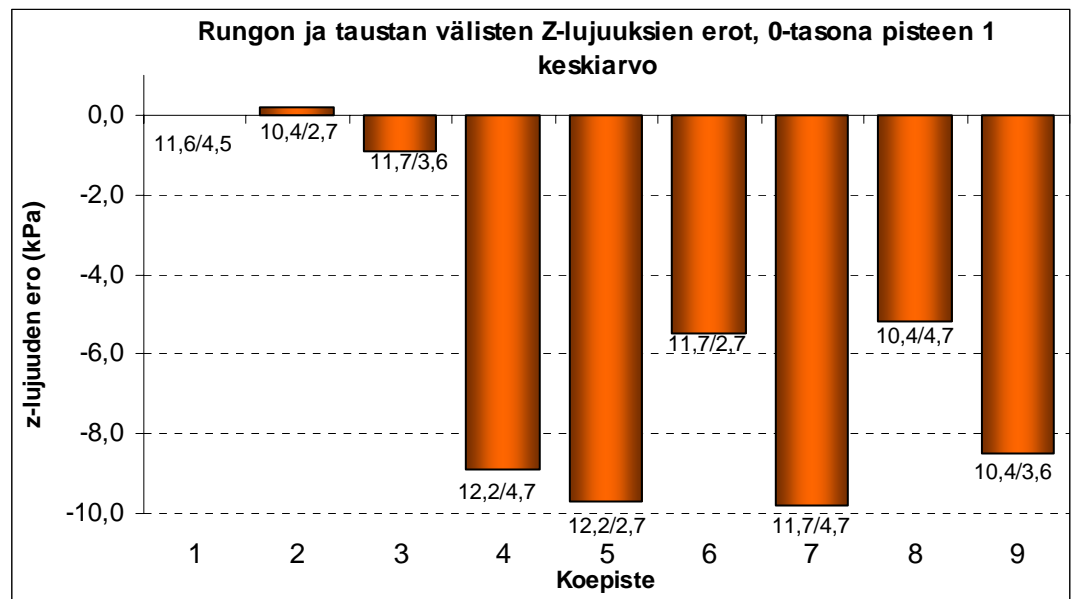
Kovinkaan luotettavaa kuvaa kerrosten välisestä palstautumisesta ei kuitenkaan IGT-menetelmällä voida saavuttaa, sillä tuloksiin vaikuttaa paljon jo menetelmässä palstautumisnopeuden lukemista varten käytetty mitta-asteikko. Käytetyllä painatusnopeudella (6 m/s) asteikon arvot muuttuvat asteittain noin 0,27 m/s välein. Toisaalta, ei myöskään pystytä varmasti sanomaan, halkeaako kartonki repeämisen jälkeen kerrosten välistä vai karkaako halkeamakohta rungon sisälle.

IGT-mittausten tuloksia voidaan siis lähinnä pitää kahden aikaisemman mittausmenetelmän tuloksia tukevina. Koska myös tällä menetelmällä pisteet 1 ja 2 osoittautuivat tasaisen vahvoiksi molempiin suuntiin, vahvistaa tämä z-lujuus ja Scott Bond -mittauksilla saatua käsitystä näiden pisteiden paremmuudesta.

8.2 Rungon ja taustan välinen palstautuminen

8.2.1 Z-suuntainen vetolujuus ja Scott Bond

Toisin kuin pinnan ja rungon välisissä mittauksissa tapahtui kartongin halkeaminen rungon ja taustan väliltä helposti ja puhtaasti. Ero näiden kahden tapauksen välillä on nähtävissä liitteessä 6 olevasta kuvasta. Tämä olikin odotettua, sillä runkoa ja taustaa toisiinsa liitettäessä vastakkain ovat rungon puolelta hienoaineköyhä viirapuoli ja taustan puolelta hienoainerikkaampi pintapuoli toisin kuin pintaa ja runkoa toisiinsa liitettäessä. Tästä siis jo huomataan, kuinka suuri merkitys paksun ja heikommin sitoutuvaa massaa sisältävän runkokerroksen hienoaineella on kerrosten välisen liitoksen kestävyYTEEN.

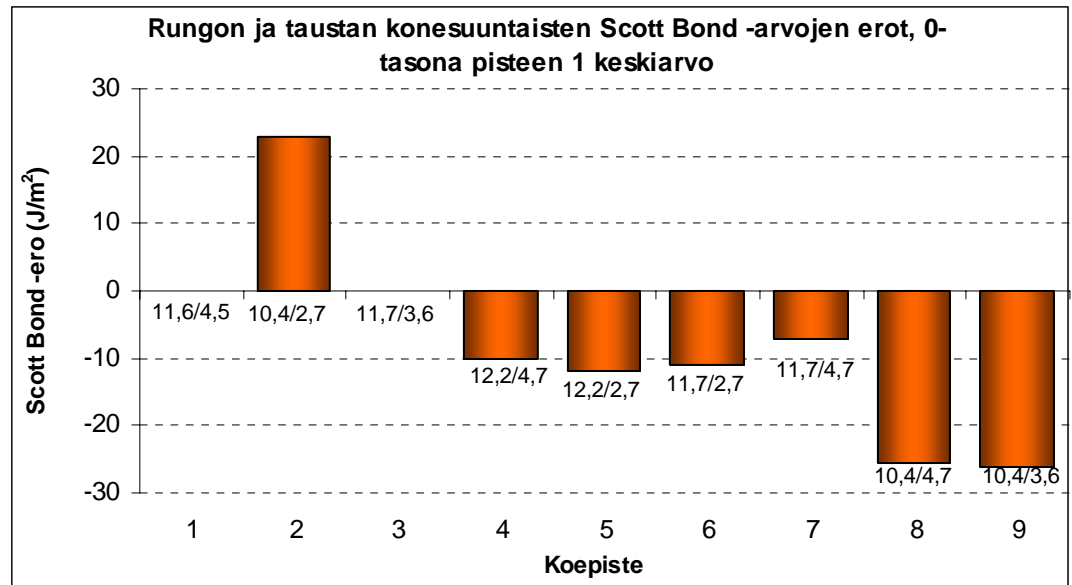


Kuva 28 Rungon ja taustan välisten Z-lujuuksien erot pisteeseen 1 nähden, pylvään alle merkitty rungon sakeus/taustan sakeus

Tarkasteltaessa kuvaa 28, jossa on esitetty Z-lujuusmittausten keskiarvojen erot pisteen 1 keskiarvoon nähden, huomataan, että pisteiden 1, 2 ja 3 keskiarvot ovat selvästi muita korkeammalla. 95 % luottamustasolla tehdyn t-testin mukaan referenssipisteellä onkin tilastollisesti merkittävä ero pisteisiin 5, 7 ja 9 verrattuna. Piste 2 sen sijaan on 95 % luottavuudella myös pistettä 4 suurempi ja piste 3 edellä mainittujen lisäksi myös pisteitä 6 ja 8 suurempi. Rungon ja taustan välisissä z-suuntaisissa vetolujuusmittauksissa näyttäisi olevan selvästi enemmän hajontaa kuin pinnan ja rungon välisissä mittauksissa ja etenkin pisteestä 1 tehtyjen mittausten hajonta on suuri. Kaikki z-suuntaisten vetolujuusmittausten tulokset ovat nähtävissä liitteessä 1, ja 95 % luottamustasolla tehtyjen t-testien tulokset liitteessä 2.

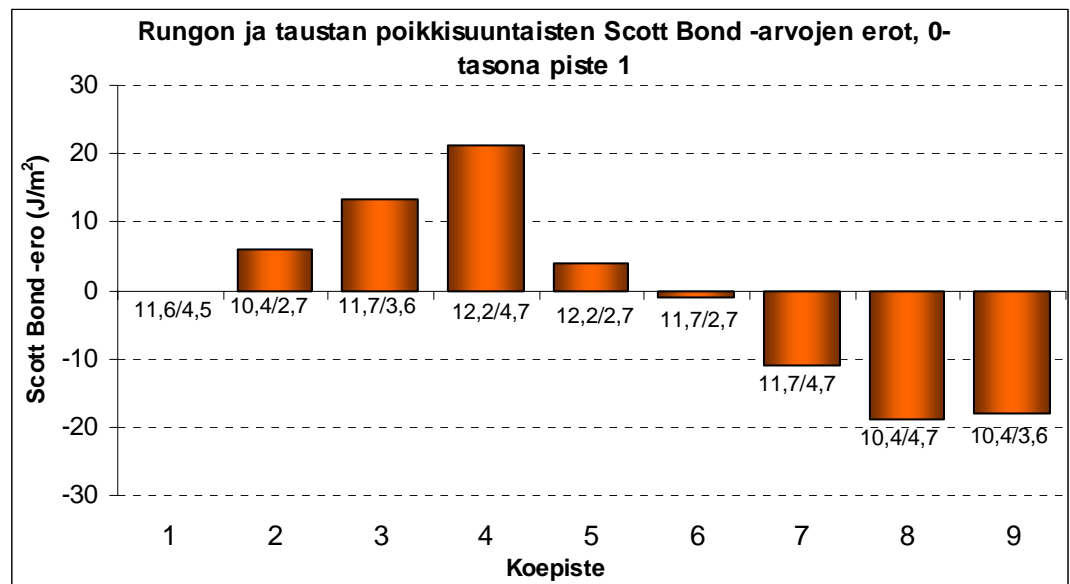
Konesuuntaisia Scott Bond -mittauksia tarkasteltaessa (kuva 29) piste 2 näyttää antavan jälleen parhaan tuloksen. T-testillä tehdyn (95 % luottamustaso) tarkastelun mukaan piste onkin merkitsevästi erisuuruinen kuin pisteet 4:stä 9:ään. Lisäksi ero pisteeseen 1 nähden on 94,7 % varmuudella todellinen. Täten ainoastaan pistettä 3 ei voida pitää lähes varmasti pistettä 2 erisuuruisena, mikä johtuu pisteestä 3 tehtyjen mittausten suuremmasta hajonnasta. Sen sijaan pisteet 1 ja 3 eivät tässä mittauksessa anna luotettavaa eroa kuin pisteisiin 8 ja 9 nähden.

Poikkisuuntaisista mittauksista (kuva 30) piste 4 antaa suurimman eron referenssipisteeseen nähden, mutta 95 % luottamustasolla tehdyn t-testin mukaan piste ei kuitenkaan eroa pisteistä 2 tai 3 ja Z-lujuusmittauksissa piste kuuluu puolestaan heikoimpiin. Täten näyttäisikin siltä, että pisteissä 2 ja 3 on taustan ja rungon välinen sitoutuminen paras. Scott Bond -mittausten tulokset on esitetty liitteessä 3 ja t-testien tulokset liitteessä 4.

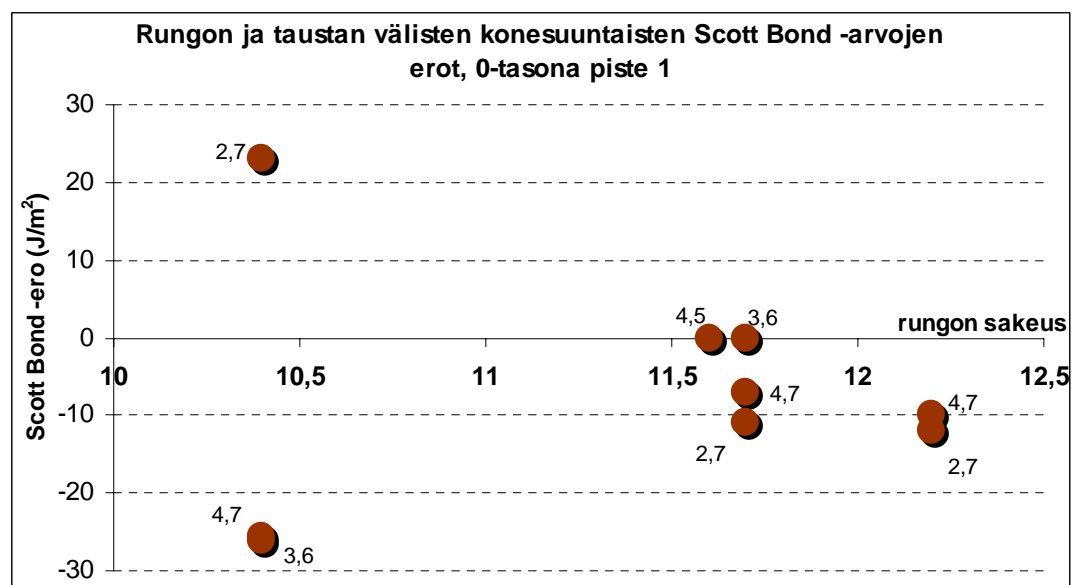


Kuva 29 Runko- ja taustakerrosten välisten konesuuntaisten Scott Bond -arvojen erot pisteen 1 keskiarvoon nähden, pylvään alle merkitty rungon sakeus/taustan sakeus

Pisteet 8 ja 9 ovat puolestaan molempiin suuntiin tehtyjen bonding-määritysten mukaan heikoimmat, mikä on hieman yllättävää, sillä kyseisillä pisteillä on sama rungon sakeus kuin pisteellä 2. Tämä antaa ymmärtää, ettei alhaisesta rungon sakeudesta ole hyötyä, mikäli myös taustan sakeus ei ole riittävän alhainen. Z-lujuusmittauksissa nämä pisteet eivät kuitenkaan ole merkittävästi muita huonompia, joten mittausmenetelmän luonteella näyttäisi olevan tuloksiin suuri vaikutus. On kuitenkin myös mahdollista, että alhaiset arvot johtuvat osittain myös näytteiden epähomogeenisuudesta, eivätkä tulokset siksi ole täysin paikkansapitäviä. Tätä tukee myös kuva 31. Siitä nähdään, että mikäli pisteet (8 ja 9), joilla on matala rungon sakeus, mutta korkeampi taustan sakeus, jätetään huomioimatta, kehittyvät konesuuntaisten Scott Bond -arvojen erot selkeästi suhteessa rungon sakeuteen. Korrelaatio ilman näitä kahta pistettä on 0,90, mitä voidaan tällä toistojen määrällä pitää jo suhteellisen merkittävänä.



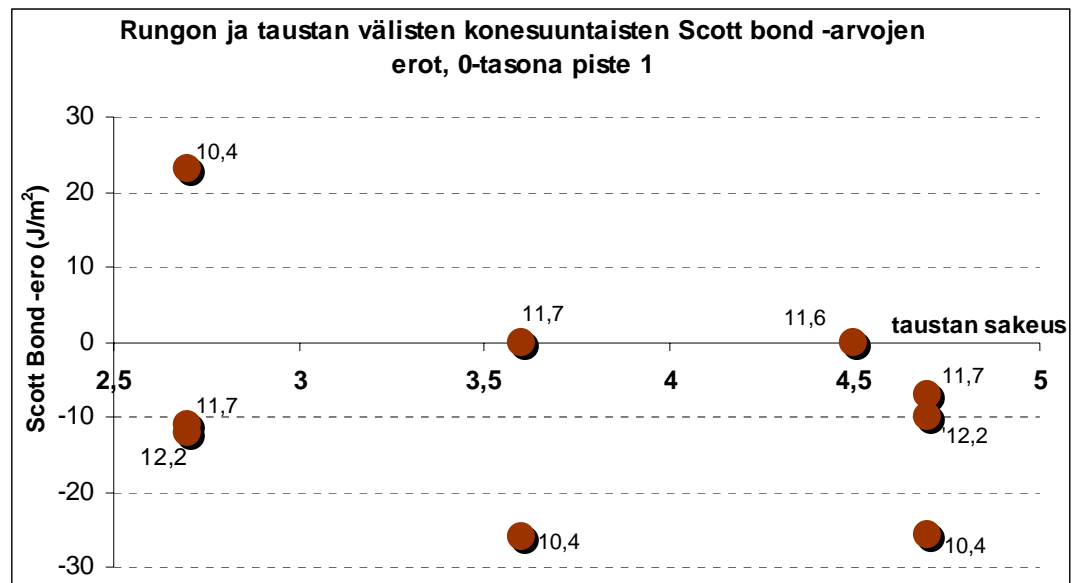
Kuva 30 Runko- ja taustakerrosten välisten poikkisuuntaisten Scott Bond -arvojen erot pisteen 1 keskiarvoon nähden, pylvään alle merkitty rungon sakeus/taustan sakeus



Kuva 31 Rungon ja taustan välisten konesuuntaisten Scott Bond -arvojen erot rungon sakeuden funktiona, pisteiden viereen merkitty taustan sakeus

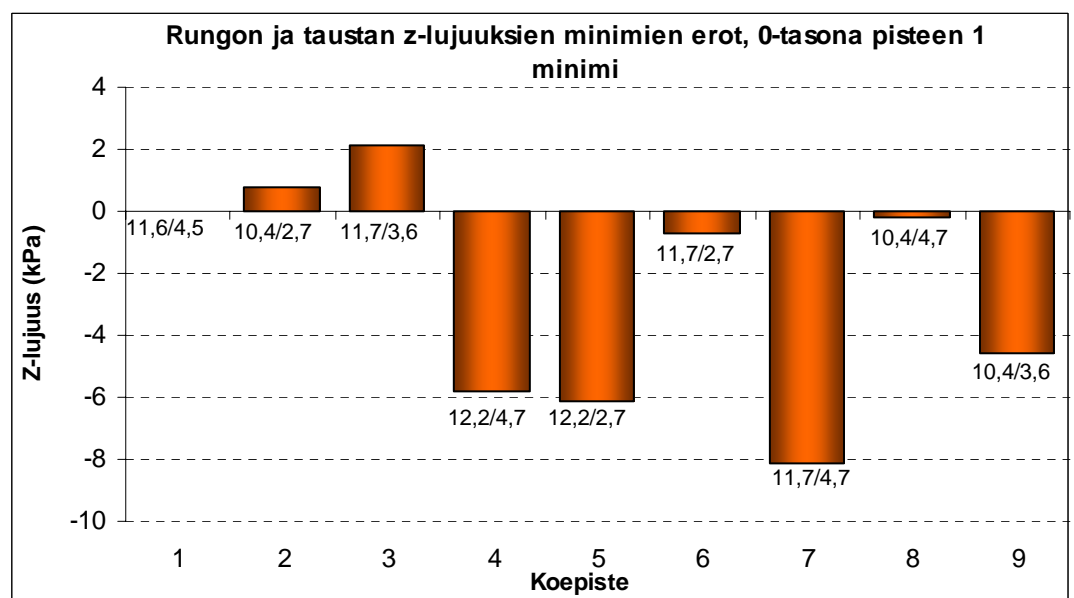
Toisaalta on kuitenkin huomattava, että kuten kuva 32 osoittaa, on ilmiö samankaltainen myös matalalla taustan sakeudella, jolloin hyvä konesuuntainen Scott Bond -arvo pisteeseen 1 nähden saavutetaan ainoastaan matalimmalla rungon sakeudella. Tämä siis antaa ymmärtää, että mikäli toisen kerroksen sakeus on alhainen, saattaa Scott Bond -arvojen välille aiheutua isojakin heittoja toisen kerroksen sakeuden muuttuessa. Mikäli esimerkiksi rungon sakeus pidetään sen

sijaan hieman korkeammalla, eivät Scott Bond -arvot eri pisteiden välillä eroa yhtä paljoa taustan sakeuden muuttuessa, kuten kuvasta 31 nähdään.



Kuva 32 Rungon ja taustan välisten konesuuntaisten Scott Bond -arvojen erot taustan sakeuden funktiona, pisteiden viereen merkitty rungon sakeus

Koska palstautuminen tapahtuu aina heikoimmasta kohdasta, on keskiarvojen lisäksi minimiarvoilla painoarvoa. Koska z-suuntainen vetolujuustesti on käytetyistä menetelmistä luotettavin ja sen virheherkkyys pienin, on näiden mittausten minimiarvoja syytä tutkia tarkemmin.



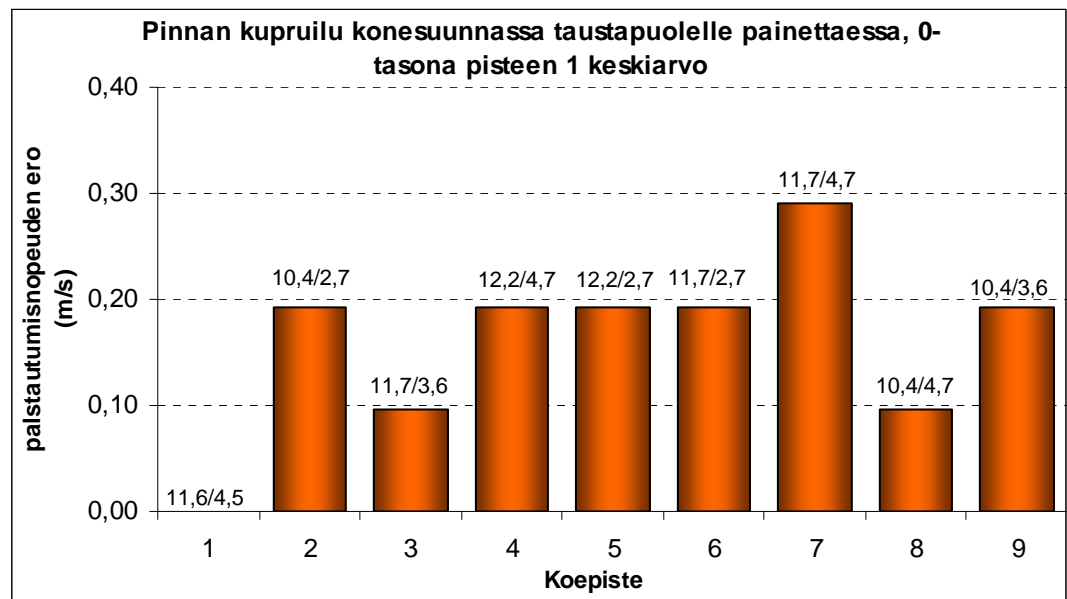
Kuva 33 Rungon ja taustan välisten Z-lujuusmittausten minimien erot pisteen 1 minimiin nähden, pylvään viereen merkitty rungon sakeus/taustan sakeus

Kuvasta 33 voidaan huomata, antaa Z-lujuudesta korkeimmat minimiarvot pisteille 1, 2 ja 3, joilla myös keskiarvot olivat korkeimmalla tasolla. Kuten jo aiemmin on todettu, ei pistettä 1 voida pitää yhtä luotettavasti muita parempana kuin pisteitä 2 ja 3.

8.2.2 IGT-palstautumisnopeus

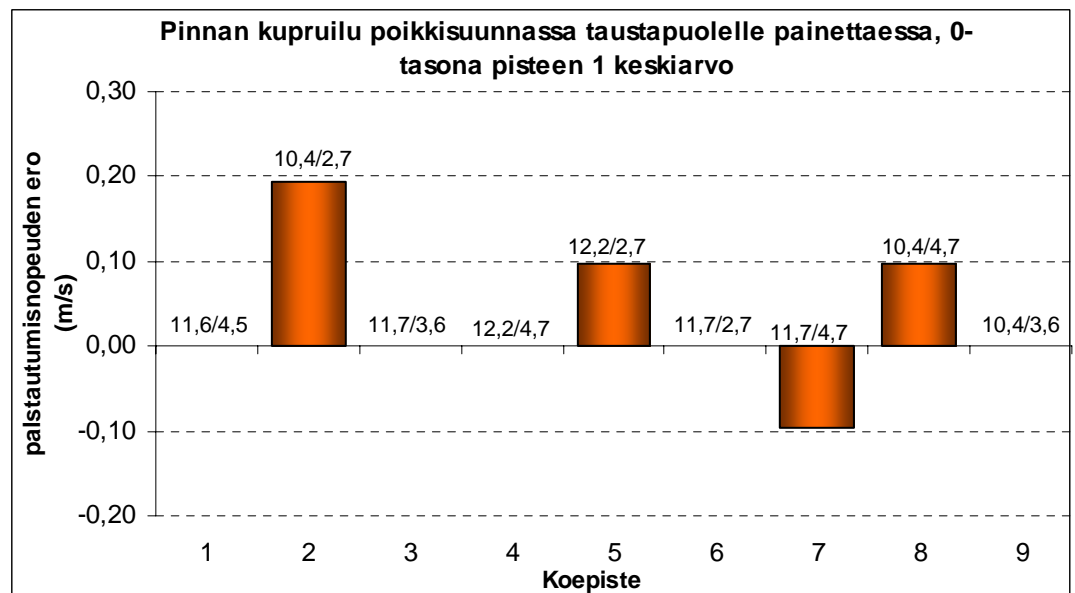
Myös taustan ja rungon välistä palstautumista tutkittiin IGT-palstautumislujuuden avulla käyttäen painatusnopeutta 6 m/s. Toisin kuin pinnan ja rungon välisissä mittauksissa, pääpaino tässä tapauksessa on näytteen kupruilulla, koska taustan puolelle painettaessa kupruilu oli huomattavasti selkeämpää ja silmämääräisesti pystyi helposti toteamaan kupruilun tapahtuvan kerrosten väliltä. Näytteet eivät myöskään revenneet yhtä helposti kuin pinnan puolelle painettaessa. Jälkikäteen ajateltuna alhaisempi painatusnopeus olisi luultavasti antanut enemmän eroja pisteiden välille, mutta koska alun perin tarkoituksena oli saada kartonki halkeamaan myös taustapuolelle painettaessa, käytettiin samaa painatusnopeutta kuin pinnan puolelle.

Kuvasta 34 nähdään, että pisteiden välille ei konesuuntaisissa mittauksissa juuri saatu eroja. Muita heikommalle tasolle näyttäisi asettuvan ainoastaan piste 1, mutta tätäkään ei voida pitää luotettavana tuloksena. Piste 2 konesuuntaisia näytteitä verrattaessa silmämääräisesti muihin pisteisiin voi kuitenkin huomata pisteiden välillä selvän eron siinä, kuinka paljon kartongin painettu pinta kupruilee kokonaisuudessaan (liite 7). Vaikka siis pisteen 2 arvo ei olekaan muita parempi, näyttäisi se kestävänsä kokonaisuudessaan paremmin painatusta.



Kuva 34 Kartongin kupruiluun vaadittavien IGT-palstautumisnopeuksien erot pisteen 1 keskiarvonopeuteen nähden taustan puolelle painettaessa (painatus konesuuntaan), pylvään ylle merkitty rungon sakeus/taustan sakeus

Poikkisuuntaisissa IGT-määrittelyissä (kuva 35) piste 2 näyttäisi jälleen kestävän painatuksen paremmin kuin muut pisteet. Myös pisteet 5 ja 8 nousevat hieman muita paremmiksi.



Kuva 35 Kartongin kupruiluun vaadittavien IGT-palstautumisnopeuksien erot pisteen 1 keskiarvonopeuteen nähden taustan puolelle painettaessa (painatus poikkisuuntaan), pylväiden ylle merkitty rungon sakeus/taustan sakeus

Vaikka pääpaino tuloksissa onkin näytteen kupruiluun vaadittavassa palstautumisnopeudessa, voidaan kuitenkin todeta joidenkin näytteiden myös revenneen taustastaan tai kerrosten väliltä asti. Poikkisuuntaisissa mittauksissa tällaisia ilmeni selvästi enemmän kuin konesuuntaisissa.

Kaikissa niissä poikkisuuntaisissa IGT-määrityksissä, joissa taustakerros rikkoontui, eteni halkeama myös kerrosten väliin pisteissä 1, 4, 5 ja 7. Näistä pisteistä kahdessa (4 ja 5) rungon sakeus oli 12,2 %, joka siis yksinään näyttäisi riittävän huonon sitoutuvuuden aikaansaamiseksi. Pisteissä 1 ja 7 rungon sakeus on puolestaan hieman alhaisempi (11,7 %), mutta molemmissa tapauksissa taustan sakeus on korkea.

Kuten jo aikaisemmin on todettu, antavat z-suuntaiset vetolujuus- ja Scott Bond -mittaukset pisteille 2 ja 3 hieman muita parempia ja ennen kaikkea tasaisempia arvoja. IGT-mittausten voidaan puolestaan todeta tukevan pisteen 2 tasaisuutta, mutta pistettä 3 se ei juuri tue.

9 TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI

Suurimman virheen tuloksiin aiheuttaa luultavimmin runkoviiran etulaidassa oleva epähomogeeninen alue, jonka sakeus on muuta rataa korkeammalla. Koska käsikäyttöisellä NDC-mittarilla tehty sakeusmittaus oli suoritettava juuri tältä epähomogeeniselta alueelta, oli myös näytteet pyrittävä ottamaan tästä kohdasta. Varmasti ei kuitenkaan pystytä toteamaan onko näyte kokonaisuudessaan tältä alueelta. Siksi samasta pisteestä otetun näytteen sisällä saattaa mittauksista saatavat tulokset vaihdella jonkin verran ollen riippuvainen näytteen tarkasta sijainnista koko poikkirataan nähden.

Virhettä tuloksiin aiheuttaa myös se tosiasia, että sakeusmittaukset suoritettiin käsimitoituksena. Kuten aikaisemmin on todettu, on anturin oltava koko mittauksen ajan tasaisesti viiraa vasten luotettavan mittaustuloksen saamiseksi. Koska jotkin mittauspaikeista ovat ahtaita ja mittauksen aikana anturiin kohdistuva voima on kohtalaisen suuri, ei mittaaminen ole helppoa. Itse mittalaitteen virhe on 10 g.

Sakeuksia ei myöskään mitattu kuin neljästä ensimmäisestä koepisteestä, joiden aikana kaikki sakeudet tuli mitattua kertaalleen. Seuraavissa koepisteissä vedenpoistoelimien alipaineet ja perälaatikoiden huuliaukot asetettiin samoihin arvoihin kuin aiemmin pisteessä, jossa sama sakeus oli mitattu. Tämän vuoksi ei voida olla varmoja siitä, ovatko kerrosten sakeudet varmuudella samat kuin mihin pyrittiin. Siten tuloksiin saattaa aiheutua paljonkin heittoja.

Mittausmenetelmistä z-suuntaisen vetolujuustestin luotettavuutta voidaan pitää parhaana, sillä hajonnat mittauksissa ovat kohtalaisen pieniä ja mittaustapahtuma on pitkälti automatisoitu. Täten mittaajasta riippuvia virhemahdollisuuksia on huomattavasti vähemmän kuin Scott Bond -mittauksessa, jossa virhettä saattaa aiheutua helpostikin.

Myöskään IGT-palstautumisnopeusmäärittelyn luotettavuutta ei voida pitää kovin korkeana, sillä kuten jo aiemmin on todettu, luetaan tulos menetelmään kuuluvasta mitta-asteikosta, joka jo itsessään aiheuttaa virhettä. Etenkin kupruilun alkamiskohdan määrittäminen aiheuttaa myös virhettä, sillä arviointi on paljolti katsojasta riippuvaista. Kaikki mittaukset teki kuitenkin saman ihminen, joten tämän kaltaiset virheet on minimoitu.

Tuloksiin on siis vaikuttamassa monia virhemahdollisuuksia, eikä niitä sen vuoksi voida pitää kovinkaan luotettavina.

10 TULOSTEN YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

10.1 Yhteenveto suoritetusta koeajosta

Yhteenvetona suoritetusta koeajosta voidaan todeta, että tulosten luotettavuutta on syytä kyseenalaistaa monestakin syystä ja etenkin Scott Bond -mittauksista olisi suuren hajonnan vuoksi pitänyt tehdä enemmän toistoja. Pinnan ja rungon välisissä mittauksissa on myös välttämätöntä tutkia z-suuntaisten vetolujuusmittausten ja Scott Bond -mittausten aiheuttamaa halkeamakohtaa yhdessä saatujen lukuarvojen kanssa.

Z-lujuusmittausten antamien arvojen sekä lähinnä Scott Bond -mittausten antamien halkeamakohtien perusteella voidaan pinnan ja rungon välisen sitoutumisen todeta olevan paras pisteissä 1 (pinta 7,4 % ja runko 11,6 %) ja 2 (pinta 6,7 % ja runko 10,4 %). Näitä pisteitä tukevat myös IGT-palstautumisnopeusmenetelmällä saadut tulokset. Tarkasteltaessa Z-lujuusmittausten antamia arvojen eroja rungon sakeuden funktiona huomataan kuitenkin, että näiden välillä on suhteellisen suuri korrelaatio, mikäli piste 1 jätetään huomioimatta. Myös Scott Bond -määritysten halkeamakohdat ovat alhaisimmalla rungon sakeudella tasaisimmin kokonaisuudessaan rungon sisältä.

Taustan ja rungon välisen sitoutuneisuuden tulkinnassa ei palstaumakohdan arvioinnilla ole niin suurta merkitystä, sillä näytteet halesivat poikkeuksetta kerrosten väliltä. Z-suuntaiset vetolujuusmittaukset antavat parhaimmat tulokset pisteille 2 ja 3 ja nämä pisteet näyttäisivät käyttäytyvän myös Scott Bond -mittauksissa tasaisimmin. Pisteessä 2 sakeudet ovat olleet 2,7 % (tausta) ja 10,4 % (runko) ja pisteessä 3 3,6 % (tausta) ja 11,7 % (runko). Rungon sakeuden ja konesuuntaisten Scott Bond -mittausten välille näyttäisi myös syntyvän korrelaatio, joka osoittaa sitoutuneisuuden heikkenevän rungon sakeuden kasvaessa. Alhaisimmalla rungon sakeudella taustan sakeus on kuitenkin kriittisempi tekijä kuin korkeampia rungon sakeuksia käytettäessä.

Kaikkiaan voidaan todeta parhaat tulokset saatavan pisteellä 2, jossa jokaisen kerroksen sakeus on alimmillaan.

10.2 Ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi

Tämän koeajon tuloksien perusteella tulisi seuraavassa koeajossa pyrkiä rungon sakeudessa vielä alhaisemmalle tasolle, kun puolestaan yhtä korkeaa rungon sakeutta kuin tässä koeajossa (12,2 %) ei ole syytä käyttää. Kuten jo aiemmin on kuitenkin todettu, ei mitattu rungon sakeus vastaa sen sakeutta liitettäessä runko- ja taustakerroksia yhteen. Mikäli rungon puoleisen sakeuden siis halutaan olevan alhaisempi vielä taustaan liitettäessä, tulisi myös sellaisten vedenpoistoelimien alipaineita muuttaa, joihin ei tässä koeajossa puututtu.

Tässä koeajossa kaikissa pisteissä tausta ja pinta olivat suhteessa toisiinsa suunnilleen samansuuruisia, sillä pinnan sakeuden ollessa alhaisin myös taustan sakeus oli alhaisin ja vastaavasti pinnan sakeuden kasvaessa myös taustan sakeus kasvoi. Siten tämä koeajo ei anna kuvaa siitä, kuinka pinnan sakeuden muutokset vaikuttavat taustan ja rungon väliseen sitoutumiseen ja enemmän informaatiota antava tapa olisikin suorittaa koeajo matriisina. Tosin tällöin ajettavia koepisteitä syntyy käytännön toteutuksen kannalta liikaa ja koeajo venyy turhan pitkäksi, joten vaihtoehtoisten koesuunnittelumenetelmien (esimerkiksi Taguchi-menetelmä) käyttöä on syytä harkita.

Taustan sakeudelle tässä koeajossa käytetty 2,7 % on varmasti sopiva minimiarvo, sillä tuolla sakeudella vesirajan nähtiin selvästi siirtyvän. Pinnan sakeutta puolestaan ei voida asettaa paljoa alle tässä työssä käytetyn alimman arvon ilman, että vesiraja siirtyy liian kauaksi. Pinnan ja taustan käytettyjä maksimiarvoja ei myöskään ole syytä laskea, sillä tämän koeajon tuloksien perusteella ei voida sanoa, milloin sakeus olisi liian korkealla. Pinnan ja rungon välisissä mittauksissa ei pinnan sakeuden kasvattaminen aiheuttanut merkittäviä muutoksia esimerkiksi Z-lujuudessa, mutta sen sijaan taustan ja rungon välisissä mittauksissa matalimmalla rungon sakeudella saavutettiin hyviä tuloksia ainoastaan alhaisimmalla taustan sakeudella. Korkeampien taustan sakeuksien käyttöä matalan rungon sakeuden kanssa olisi syytä tarkastella uudelleen, sillä mikäli tämän koeajon tulokset osoittautuvat oikean suuntaisiksi, on matalalla rungon sakeudella operoitaessa kerrosten välinen sitoutuminen erittäin herkkä taustan sakeudessa tapahtuville muutoksille. Koska alhaisilla sakeuksilla saatiin kuitenkin paras tulos, olisi runkoa tästäkin syystä kokeiltava ajaa vielä alhaisemmalla sakeudella.

Näytteistä tehtävistä mittauksista Scott Bond -määrittämiä on syytä tehdä useampia rinnakkaisia suuren hajonnan vuoksi ja IGT-menetelmän käyttökelpoisuutta on syytä harkita. Koepisteiden kerrosten välisestä sitoutumispotentialista saataisiin myös parempi kuva, mikäli niistä suoritetaan hienoainejakaumamäärittäykset. Tämä antaisi paremman kuvan todellisesta halkeamakohdasta kuin silmämääräinen arvio, sillä pinnan ja rungon välinen halkeaminen tapahtuu todennäköisimmin kohdasta, jossa runkokerroksen hienoaineen määrä on riittävän alhaisella tasolla. Hienoainejakaumamäärittäyksen avulla pystyttäisiin siis selvittämään, aiheuttaako korkeamman rungon sakeuden tavoittelu tasoviiraratkaisussa viiran puolelle

muodostuvan hienoaineköyhän alueen leviämisen lähemmäs rainan pintaa. Mikäli on mahdollista, olisi kartongin kerrosten välistä palstautumista hyvä tutkia myös lopullisen käyttökohteen yhteydessä.

Yhteenvetona seuraavaan koeajoon voidaan todeta seuraavaa:

- Rungon sakeus on asetettava alhaisemmalle tasolle kuin tässä koeajossa.
- Pinta- ja runkokerrosten liitoksen jälkeen sijaitsevien vedenpoistoelimien alipaineita on muutettava, jotta rungon puoleinen sakeus olisi alhaisempi myös taustaan liittyessä.
- Pintakerroksen sakeuden vaikutus tausta- ja runkokerrosten väliseen sitoutumiseen on tutkittava, jolloin koeajo on toteutettava matriisina.
- Koeajosta otettavista näytteistä tulee tehdä enemmän rinnakkaisia määrittäyksiä etenkin Scott Bond -mittauksella luotettavamman tuloksen saamiseksi.
- Tulosten luotettavuutta voitaisiin parantaa myös hienoainejakaumamäärittysten avulla.

LÄHDELUETTELO

Painetut lähteet

- 1 Heikkurinen, A. – Leskelä, L., The character and properties of mechanical pulps. Mechanical pulping, Toim. Sundholm, J. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999, s. 394–413.
- 2 Holik, H.(toim.), Handbook of paper and paperboard. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Druckhaus Diesbach GmbH. Weinheim, Germany 2006, 505 s.
- 3 Häggblom-Ahnger, U. – Komulainen, P., Paperin ja kartongin valmistus. Kemiallinen metsäteollisuus 2, 3–1. painos. Opetushallitus. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä 2005, 279 s.
- 4 Joukio, R. – Mansikkamäki, S., Cartonboard package manufacturing and applications. Paper and paperboard converting, Toim. Savolainen, A. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1998, s. 214–241.
- 5 Jussila, T. – Tienvieri, T. – Sundholm, J., Flow sheets for various paper grades. Mechanical pulping, Toim. Sundholm J. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999, s.364–373.
- 6 Kajanto, I. – Laamanen, J. – Kainulainen, M., Paper bulk and surface. Paper physics, Toim. Niskanen, K. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1998, s. 88–115.
- 7 Kajanto, I., Structural mechanics of paper and board. Paper physics, Toim. Niskanen, K. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1998, s. 192–221.
- 8 Karhuketo H. – Seppälä M. J. –Törn T. – Viluksela P., Paperin ja kartongin jalostus. Kemiallinen metsäteollisuus 3, 2. uudistettu painos. Opetushallitus, 2004, 219 s.
- 9 Kartonkikoneet, Puusta paperiin M-506, 2. Muunnettu painos. Sepsilva ltd oy. Gummerus Kirjapaino Oy. Saarijärvi 1997, 255 s.
- 10 Ketola, H. – Anderson, T., Dry-strength additives. Papermaking chemistry, Toim. Neimo, L. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999, s. 268-287.
- 11 Kiviranta, A., Paperboard grades. Paper and board grades, Toim. Paulapuro, H. Fapet Oy Gummerus Printing. Jyväskylä 2000, s.54–72.
- 12 Kiviranta, A. – Paulapuro, H., Comparison of hydraulic and rectifier roll headboxes in the manufacture of the middle ply of folding boxboard. Paperi ja Puu 4/1990, s.335-344.
- 13 Koubaa, A. – Koran, Z., Measure of the internal bond strength of paper/board. TAPPI Journal 3/1995, s. 103-111.

- 14 Krogerus, B., Fillers and pigments. Papermaking chemistry, Toim. Neimo, L. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999, s. 115-149
- 15 Levlin, J.-E., General physical properties of paper and board. Pulp and paper testing, Toim. Levlin, J.-E. – Söderhjelm, L. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999. s. 137–159.
- 16 Liimatainen, H. – Haikkala, P. – Lucander, M. – Karojärvi, R. – Tuovinen, O., Grinding and pressure grinding. Mechanical pulping, Toim. Sundholm, J. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999, s. 105–156.
- 17 Lindahl, K., Kartonkikoneen määränpään toiminnot/kartonkikoneen märkäviirat ja puristinhuovat. AEL, Metsäteollisuuden koulutuskeskus. Oy Fennofelt Ab, 1988.
- 18 Lindholm, C.-A. – Kurdin, J.A., Chemimechanical pulping. Mechanical pulping, Toim. Sundholm, J. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999, s. 222–249.
- 19 Moglia, C., Alkujalostus. Laivaseminaari 14 - 16.3.1990. INSKO, julkaisu 43-90, kartongista lopputuotteeksi, 1990, 11 s.
- 20 Niskanen, K. – Kajanto, I. – Pakarinen, P., Paper structure. Paper physics, Toim. Niskanen, K. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1998, s.13–53.
- 21 Norell, M. – Johansson, K. – Persson, M., Retention and drainage. Papermaking chemistry, Toim. Neimo, L. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1999, s. 42–81.
- 22 Norman, B., Web forming. Papermaking part 1, stock preparation and wet end, Toim. Paulapuro, H. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 2000, s.191–250.
- 23 Oittinen, P. – Saarelma, H., Printing. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1998, 295s.
- 24 Retulainen, E. – Niskanen, K. – Nilsen, N., Fibers and bonds. Paper physics, Toim. Niskanen, K. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1998, s. 54–87.
- 25 Saari, J., Coating of boards. Pigment coating and surface sizing of paper, Toim. Lehtinen, E. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 2000, s.578–592.
- 26 Smook, G.A., Handbook for pulp & paper technologists, 3. painos. Angus Wilde Publications. Vancouver, Canada, 2002, 425 s.
- 27 Vähä-Nissi, M. – Kuusipalo, J., Wetting and adhesion in paper and paperboard converting. Paper and paperboard converting, Toim. Savolainen, A. Fapet Oy. Gummerus Printing. Jyväskylä 1998, s. 24–59.
- 28 Wahlström, T. – Lundh, A. – Hansson, T. – Fellers, C., Biaxial straining of handsheets during drying – Effect on delamination resistance. Nordic Pulp and Paper Research Journal 3/2000, s. 237-242.

Painamattomat lähteet

- 29 Heiskanen, I., sisäinen seloste, Enso-Gutzeit Oy, 1991.
- 30 Jokinen, O., Sisäinen seloste, Enso-Gutzeit Oy, 1981.
- 31 Katajamäki, S., Jatkojalostuksen asettamat vaatimukset taivekartongin palstautumislujuudelle, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo, 2001, 77s.
- 32 Kolhonen, E., Oy Keskuslaboratorio, julkaisematon seloste 1994.
- 33 Rintamäki Tuomas, paperitekniikan insinööri. Haastattelu 1.2.2008. Tamfelt PMC Oy.
- 34 Saharinen, E., Oy Keskuslaboratorio, julkaisematon seloste, 2001.
- 35 Viitaharju, P., Paperitekniikka 1. Kurssimateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu. Paperitekniikan koulutusohjelma. Tampere 2007

Sähköiset lähteet

- 36 AccuProbe Model 1000 Series. [pdf-tiedosto.] NDC Infrared Engineering. [viitattu 10.01.2008] Saatavissa: <http://www.ndcinfrared.com/ndc/industries%20mt/converting/side%20menu/fixed%20point%20systems/accuprobe.aspx>
- 37 Knowpap, Paperin ja automaation oppimisympäristö, Versio 8.0. VTT tuotteet ja tuotanto, ProWledge Oy.
- 38 Lappalainen, J.T.J, paperin- ja kartonginvalmistusprosessien mallinnus ja dynaaminen reaaliaikainen simulointi. [pdf-tiedosto.] Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). VTT Publications 518. Espoo 2004. [viitattu 09.01.2008] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2004/P518.pdf>
- 39 Lorenzen & Wettre, Z-lujuus (ZDT strenght). Esittelymateriaali. [Powerpoint-tiedosto]

Z-SUUNTAISTEN VETOLUJUUSMITTAUSTEN EROT, 0-Tasona pisteen 1 keskiarvo

Koepiste 1

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-5,6	3
2.	1,8	3
3.	3,9	3
4.	-4,8	3
5.	0,6	3
6.	3,9	3
ka.	0,0	
st.dev.	4,2	
luot.väl. 95%	3,4	
moodi		3
runko+tausta		
1.	-8,8	0
2.	12,4	0
3.	-5,2	0
4.	-7,2	0
5.	6,8	0
6.	1,9	0
ka.	0,0	
st.dev.	8,5	
luot.väl. 95%	6,8	
moodi		0

Koepiste 2

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-8,6	3
2.	-8,4	3
3.	-8,9	3
4.	-5,3	3
5.	1,3	2
6.	-1,0	2
ka.	-5,1	
st.dev.	4,4	
luot.väl. 95%	3,5	
moodi		3
runko+tausta		
1.	5,8	0
2.	2,2	0
3.	-5,7	0
4.	2,2	0
5.	4,5	0
6.	-8,0	0
ka.	0,2	
st.dev.	5,7	
luot.väl. 95%	4,6	
moodi		0

Koepiste 3

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-10,9	3
2.	-10,7	2
3.	-7,1	3
4.	-11,2	3
5.	-9,4	3
6.	-11,2	2
ka.	-10,1	
st.dev.	1,6	
luot.väl. 95%	1,3	
moodi		3
runko+tausta		
1.	-1,9	0
2.	2,5	0
3.	1,2	0
4.	1,4	0
5.	-1,9	0
6.	-6,7	0
ka.	-0,9	
st.dev.	3,4	
luot.väl. 95%	2,7	
moodi		0

Koepiste 4

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-12,5	3
2.	-13,5	3
3.	-7,9	2
4.	-10,2	2
5.	-13,5	2
6.	-13,0	2
ka.	-11,8	
st.dev.	2,3	
luot.väl. 95%	1,8	
moodi		2
runko+tausta		
1.	-9,3	0
2.	-12,3	0
3.	-11,1	0
4.	-8,8	0
5.	-14,6	0
6.	2,7	0
ka.	-8,9	
st.dev.	6,1	
luot.väl. 95%	4,9	
moodi		0

Koepiste 5

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-12,2	3
2.	-15,0	3
3.	-19,9	3
4.	-14,2	2
5.	-22,9	3
6.	-19,6	3
ka.	-17,3	
st.dev.	4,1	
luot.väl. 95%	3,3	
moodi		3
runko+tausta		
1.	-14,9	0
2.	-12,6	0
3.	-4,7	0
4.	-6,7	0
5.	-5,7	0
6.	-13,4	0
ka.	-9,7	
st.dev.	4,4	
luot.väl. 95%	3,5	
moodi		0

Koepiste 6

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-9,6	3
2.	-13,1	3
3.	-16,0	3
4.	-5,1	3
5.	-4,3	2
6.	-2,8	3
ka.	-8,5	
st.dev.	5,3	
luot.väl. 95%	4,2	
moodi		3
runko+tausta		
1.	-8,0	0
2.	-8,0	0
3.	-2,6	0
4.	-3,7	0
5.	-9,5	0
6.	-1,4	0
ka.	-5,5	
st.dev.	3,4	
luot.väl. 95%	2,7	
moodi		0

Z-SUUNTAISTEN VETOLUJUUSMITTAUSTEN EROT, 0-Tasona pisteen 1 keskiarvo

Koepiste 7

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-5,6	3
2.	-7,6	2
3.	-10,9	3
4.	-11,9	2
5.	-8,6	2
6.	-5,1	3
ka.	-8,3	
st.dev.	2,8	
luot.väl. 95%	2,2	
moodi		3
runko+tausta		
1.	-8,8	0
2.	-11,3	0
3.	-7,2	0
4.	-6,0	0
5.	-16,9	0
6.	-8,8	0
ka.	-9,8	
st.dev.	3,9	
luot.väl. 95%	3,1	
moodi		0

Koepiste 8

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-6,6	3
2.	-8,9	3
3.	-3,8	2
4.	-8,4	3
5.	-4,0	2
6.	-2,0	3
ka.	-5,6	
st.dev.	2,8	
luot.väl. 95%	2,2	
moodi		3
runko+tausta		
1.	-9,0	0
2.	-1,9	0
3.	-2,6	0
4.	-8,8	0
5.	-3,2	0
6.	-5,7	0
ka.	-5,2	
st.dev.	3,1	
luot.väl. 95%	2,5	
moodi		0

Koepiste 9

pinta+runko		
	ero 0-tasosta (kPa)	halkeama
1.	-10,2	2
2.	-13,0	3
3.	-8,1	3
4.	-7,1	3
5.	-4,3	3
6.	-8,6	2
ka.	-8,5	
st.dev.	2,9	
luot.väl. 95%	2,3	
moodi		3
runko+tausta		
1.	-13,4	0
2.	-10,0	0
3.	-4,4	0
4.	-5,5	0
5.	-7,5	0
6.	-10,3	0
ka.	-8,5	
st.dev.	3,3	
luot.väl. 95%	2,6	
moodi		0

Halkeamakohdan arviointi:

- 0 = halkeaminen puhtaasti kerrosten väliltä
 1 = halkeaminen pääasiassa kerrosten väliltä, osittain kuitenkin myös rungon sisältä
 2 = halkeaminen pääasiassa rungon sisältä, osittain kuitenkin myös kerrosten väliltä
 3 = halkeaminen kokonaisuudessaan rungon sisältä

T-TESTIEN TULOKSET Z-SUUNTAISISTA VETOLUJUUSMITTAUKSISTA

T-testi (95 % luottamustaso)

pinnan ja rungon välinen Z-lujuus

piste 1 erisuuri kuin... (tummennettu)

	t	t-kriittinen	p-arvo
piste 2	2,07	2,23	0,06560
piste 3	5,47	2,23	0,00027
piste 4	6,02	2,23	0,00013
piste 5	7,20	2,23	0,00003
piste 6	3,06	2,23	0,01204
piste 7	4,02	2,23	0,00243
piste 8	2,71	2,23	0,02176
piste 9	4,07	2,23	0,00225

piste 2 erisuuri kuin... (tummennettu)

	t	t-kriittinen	p-arvo
piste 3	2,60	2,22	0,027
piste 4	3,30	2,23	0,008
piste 5	4,96	2,23	0,001
piste 6	1,19	2,23	0,262
piste 7	1,49	2,23	0,168
piste 8	0,22	2,23	0,830
piste 9	1,58	2,23	0,144

T-testi (95 % luottamustaso)

rungon ja taustan välinen Z-lujuus

piste 1 erisuuri kuin... (tummennettu)

	t	t-kriittinen	p-arvo
piste 2	-0,04	2,23	0,97
piste 3	0,24	2,23	0,82
piste 4	2,09	2,23	0,06
piste 5	2,47	2,23	0,03
piste 6	1,48	2,23	0,17
piste 7	2,58	2,23	0,03
piste 8	1,40	2,23	0,19
piste 9	2,28	2,23	0,05

piste 2 erisuuri kuin... (tummennettu)

	t	t-kriittinen	p-arvo
piste 3	0,40	2,23	0,700
piste 4	2,68	2,23	0,023
piste 5	3,35	2,23	0,007
piste 6	2,12	2,23	0,060
piste 7	3,57	2,23	0,005
piste 8	2,03	2,23	0,070
piste 9	3,23	2,23	0,009

piste 3 erisuuri kuin... (tummennettu)

	t	t-kriittinen	p-arvo
piste 4	2,83	2,23	0,018
piste 5	3,84	2,23	0,003
piste 6	2,38	2,23	0,039
piste 7	4,25	2,23	0,002
piste 8	2,29	2,23	0,045
piste 9	3,92	2,23	0,003

SCOTT BOND -MITTAUSTEN EROT, 0-tasona kyseiseen suuntaan olevan pisteen 1 keskiarvo

Koepiste 1

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	22	3	1.	-41	3
2.	-7	2	2.	-23	3
3.	-28	3	3.	-38	2
4.	2	3	4.	4	3
5.	44	2	5.	1	2
6.	-21	3	6.	17	2
7.	14	3	7.	48	3
8.	-2	2	8.	2	3
9.	-22	3	9.	41	3
10.	-1	3	10.	-7	3
ka.	0		ka.	0	
st.dev.	22		st.dev.	30	
luot.väli 95 %	13,6		luot.väli 95 %	18,6	
moodi		3	moodi		3

rungan ja taustan välinen

rungan ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	19	0	1.	13	0
2.	-26	0	2.	-23	0
3.	7	0	3.	-11	0
4.	-21	0	4.	33	0
5.	-13	0	5.	-19	0
6.	4	0	6.	2	0
7.	-17	0	7.	8	0
8.	-14	0	8.	-12	0
9.	23	0	9.	-18	0
10.	40	0	10.	22	0
ka.	0		ka.	0	
st.dev.	22		st.dev.	19	
luot.väli 95 %	13,6		luot.väli 95 %	11,8	
moodi		0	moodi		0

Koepiste 2

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-32	3	1.	36	3
2.	6	3	2.	6	3
3.	-15	2	3.	-8	2
4.	-26	2	4.	-8	3
5.	-29	3	5.	41	3
6.	-25	2	6.	-8	3
7.	14	3	7.	-20	2
8.	42	3	8.	0	3
9.	-31	2	9.		
10.	-7	3	10.	17	3
ka.	-10		ka.	6	
st.dev.	24		st.dev.	21	
luot.väli 95 %	14,9		luot.väli 95 %	13,8	
moodi		3	moodi		3

rungan ja taustan välinen

rungan ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	78	0	1.	32	0
2.	8	0	2.	-11	0
3.	8	0	3.	5	0
4.	-17	0	4.	2	0
5.	26	0	5.	18	0
6.	8	0	6.	-19	0
7.	36	0	7.	35	0
8.	1	0	8.	-28	0
9.	46	0	9.	10	0
10.	36	1	10.	13	0
ka.	23		ka.	6	
st.dev.	27		st.dev.	21	
luot.väli 95 %	16,7		luot.väli 95 %	13,0	
moodi		0	moodi		0

Koepiste 3

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-20	3	1.	-30	3
2.	-20	3	2.	61	2
3.	5	3	3.	23	2
4.	-32	3	4.	-29	3
5.	-20	3	5.	17	3
6.	6	3	6.	-48	3
7.	-37	3	7.	-36	3
8.	-9	3	8.	-46	3
9.	-11	3	9.	-31	2
10.	1	3	10.	-14	2
ka.	-14		ka.	-13	
st.dev.	15		st.dev.	36	
luot.väli 95 %	9,3		luot.väli 95 %	22,3	
moodi		3	moodi		3

rungan ja taustan välinen

rungan ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.			1.	44	1
2.	34	0	2.	4	0
3.	-26	0	3.	80	0
4.	24	0	4.	-3	0
5.	29	0	5.	6	0
6.	-16	0	6.	-19	0
7.	24	0	7.	-15	0
8.	-42	0	8.	2	0
9.	2	0	9.	-3	0
10.	-30	0	10.	37	0
ka.	0		ka.	13	
st.dev.	29		st.dev.	31	
luot.väli 95 %	19,0		luot.väli 95 %	19,2	
moodi		0	moodi		0

Puuttuvat arvot ovat epäonnistuneita mittauksia

SCOTT BOND -MITTAUSTEN EROT, 0-tasona kyseiseen suuntaan olevan pisteen 1 keskiarvo

Koepiste 4

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-30	3	1.	-3	3
2.	-18	3	2.	-25	2
3.	-30	2	3.	-21	3
4.	-48	2	4.	48	2
5.	-29	2	5.	23	3
6.	-22	2	6.	13	3
7.	2	3	7.	-15	3
8.	-6	2	8.	-22	3
9.	-35	2	9.	-2	3
10.	-21	2	10.	-29	3
ka.	-24		ka.	-3	
st.dev.	14		st.dev.	25	
luot.väli 95 %	8,7		luot.väli 95 %	15,5	
moodi		2	moodi		3

rungen ja taustan välinen

rungen ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-30	0	1.	8	0
2.	-17	0	2.	-21	0
3.	-11	0	3.	-10	0
4.	-10	0	4.	4	0
5.	4	0	5.	27	0
6.	13	0	6.	33	1
7.	-36	0	7.	66	0
8.	-21	0	8.		
9.	-21	0	9.	58	1
10.	30	0	10.	26	0
ka.	-10		ka.	21	
st.dev.	20		st.dev.	27	
luot.väli 95 %	12,4		luot.väli 95 %	17,9	
moodi		0	moodi		0

Koepiste 5

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-30	3	1.	30	3
2.	18	2	2.	48	3
3.	-25	2	3.	-2	2
4.	-6	3	4.	-7	2
5.	-24	2	5.	5	2
6.	-47	2	6.	9	3
7.	26	2	7.	0	2
8.	1	2	8.	-43	2
9.	-60	2	9.	43	3
10.	-22	3	10.	-21	2
ka.	-17		ka.	6	
st.dev.	27		st.dev.	28	
luot.väli 95 %	16,7		luot.väli 95 %	17,4	
moodi		2	moodi		2

rungen ja taustan välinen

rungen ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	6	0	1.	15	0
2.	-13	0	2.	-18	0
3.	-42	0	3.	-3	0
4.	7	1	4.	9	0
5.	-45	0	5.	4	0
6.	-30	0	6.	26	0
7.	-20	0	7.	10	0
8.	-9	0	8.	-15	0
9.	15	0	9.	33	0
10.	6	0	10.	-25	0
ka.	-12		ka.	4	
st.dev.	21		st.dev.	19	
luot.väli 95 %	13,0		luot.väli 95 %	11,8	
moodi		0	moodi		0

Koepiste 6

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	18	2	1.	-29	2
2.	-14	2	2.	-3	3
3.	53	3	3.	-8	2
4.	-6	3	4.	-7	3
5.	-24	2	5.	1	3
6.	-43	2	6.	19	3
7.	1	2	7.	0	3
8.	-42	2	8.	13	2
9.	-34	2	9.	-46	3
10.	-30	2	10.	-4	3
ka.	-12		ka.	-6	
st.dev.	30		st.dev.	19	
luot.väli 95 %	18,6		luot.väli 95 %	11,8	
moodi		2	moodi		3

rungen ja taustan välinen

rungen ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	4	0	1.	19	1
2.	-17	0	2.	26	0
3.	0	1	3.	11	0
4.	-34	0	4.	-14	0
5.	-21	0	5.	7	0
6.	-42	0	6.	-6	0
7.	-29	0	7.	2	0
8.	15	0	8.	-18	0
9.	-29	0	9.	-18	0
10.	46	1	10.	-18	0
ka.	-11		ka.	-1	
st.dev.	27		st.dev.	16	
luot.väli 95 %	16,7		luot.väli 95 %	9,9	
moodi		0	moodi		0

Puuttuvat arvot ovat epäonnistuneita mittauksia

SCOTT BOND -MITTAUSTEN EROT, 0-tasona kyseiseen suuntaan olevan pisteen 1 keskiarvo

Koepiste 7

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-34	2	1.	2	2
2.	-49	3	2.	6	2
3.	-3	3	3.	18	2
4.	-34	3	4.	22	2
5.	-34	2	5.	-7	2
6.	-25	2	6.	-29	2
7.	-24	3	7.	-29	2
8.	18	2	8.	9	3
9.	-34	2	9.	-20	2
10.	-4	2	10.	39	3
ka.	-22		ka.	1	
st.dev.	20		st.dev.	23	
luot.väli 95 %	12,4		luot.väli 95 %	14,3	
moodi		2	moodi		2

rungan ja taustan välinen

rungan ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	5	0	1.	-50	0
2.	-28	0	2.	-22	0
3.	19	0	3.	-17	0
4.	-1	0	4.	-17	0
5.	-10	0	5.	18	0
6.	-38	0	6.	-24	0
7.	-16	0	7.	-15	0
8.	-14	0	8.	-39	0
9.	11	0	9.	35	0
10.	-1	0	10.	18	0
ka.	-7		ka.	-11	
st.dev.	17		st.dev.	27	
luot.väli 95 %	10,5		luot.väli 95 %	16,7	
moodi		0	moodi		0

Koepiste 8

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-18	2	1.	17	2
2.	37	3	2.	-10	3
3.	-30	3	3.	-17	3
4.	-34	3	4.	-42	3
5.	-12	3	5.	-30	3
6.	-2	2	6.	-17	3
7.	26	2	7.	22	2
8.	-19	2	8.	19	2
9.	-10	3	9.	-15	2
10.	-42	2	10.	-26	3
ka.	-10		ka.	-10	
st.dev.	25		st.dev.	22	
luot.väli 95 %	15,5		luot.väli 95 %	13,6	
moodi		2	moodi		3

rungan ja taustan välinen

rungan ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-30	0	1.	-15	0
2.	-43	0	2.	-15	0
3.	-26	0	3.	-19	0
4.			4.	-23	0
5.	19	0	5.	-11	0
6.	-45	0	6.	-11	0
7.	-17	0	7.	-44	0
8.	-22	0	8.	-38	0
9.	-17	0	9.	-20	0
10.	-50	0	10.	2	0
ka.	-26		ka.	-19	
st.dev.	21		st.dev.	13	
luot.väli 95 %	13,6		luot.väli 95 %	8,1	
moodi		0	moodi		0

Koepiste 9

pinnan ja rungon välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-34	3	1.	-11	3
2.	-38	3	2.	33	3
3.	-14	2	3.	-26	3
4.	33	3	4.	-30	3
5.	-13	2	5.	0	3
6.	-43	3	6.	-15	3
7.	-46	2	7.	-11	3
8.	-10	2	8.	-43	3
9.	19	2	9.	10	3
10.	-19	3	10.	-8	3
ka.	-16		ka.	-10	
st.dev.	26		st.dev.	21	
luot.väli 95 %	16,1		luot.väli 95 %	13,0	
moodi		3	moodi		3

rungan ja taustan välinen

rungan ja taustan välinen					
Konesuuntaan			Poikkisuuntaan		
	ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama		ero 0-tasosta (J/m ²)	halkeama
1.	-44	0	1.	-19	0
2.	15	0	2.	-23	0
3.	-35	0	3.	-18	0
4.	-49	0	4.	-38	0
5.	-50	0	5.	-15	0
6.	-24	0	6.	26	0
7.	-27	0	7.	-23	0
8.	-25	0	8.	-28	0
9.	-26	0	9.	3	0
10.	4	0	10.	-45	0
ka.	-26		ka.	-18	
st.dev.	21		st.dev.	20	
luot.väli 95 %	13,2		luot.väli 95 %	12,4	
moodi		0	moodi		0

Puuttuvat arvot ovat epäonnistuneita mittauksia

T-TESTIEN TULOKSET SCOTT BOND -MITTAUKSISTA

T-testi (95 % luottamustaso)

Pinnan ja rungon välinen konesuuntainen Scott Bond

piste 1 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	kriittinen t	p-arvo
piste 2	1,00	2,10	0,33
piste 3	1,64	2,10	0,12
piste 4	2,86	2,10	0,01
piste 5	1,54	2,10	0,14
piste 6	1,34	2,10	0,31
piste 7	2,38	2,10	0,03
piste 8	0,99	2,10	0,33
piste 9	1,54	2,10	0,14

pinnan ja rungon välinen poikkisuuntainen Scott Bond

piste 1 eri suuri kuin...

	t	kriittinen t	p-arvo
piste 2	-0,49	2,10	0,63
piste 3	0,93	2,10	0,36
piste 4	0,30	2,10	0,77
piste 5	-0,45	2,10	0,66
piste 6	0,61	2,10	0,55
piste 7	-0,06	2,10	0,95
piste 8	0,88	2,10	0,39
piste 9	0,90	2,10	0,38

piste 2 eri suuri kuin...

	t	kriittinen t	p-arvo
piste 3	1,434	2,10	0,17
piste 4	0,897	2,10	0,38
piste 5	0,002	2,10	1,00
piste 6	1,377	2,10	0,19
piste 7	0,510	2,10	0,62
piste 8	1,623	2,10	0,12
piste 9	1,672	2,10	0,11

Pinnan ja rungon välinen Scott bond, kun kone- ja poikkisuuntaiset mittaukset yhdistetään

piste 1 eri suuri kuin...

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 2	0,35	2,03	0,73
piste 3	1,67	2,02	0,10
piste 4	1,81	2,02	0,08
piste 5	0,64	2,02	0,53
piste 6	1,20	2,02	0,24
piste 7	1,38	2,02	0,18
piste 8	1,35	2,03	0,18
piste 9	1,75	2,02	0,09

piste 2 eri suuri kuin...

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 3	1,36	2,03	0,18
piste 4	1,48	2,03	0,15
piste 6	0,33	2,03	0,74
piste 7	0,87	2,03	0,39
piste 8	1,05	2,03	0,30
piste 9	1,02	2,03	0,32
piste 10	1,42	2,03	0,16

T-TESTIEN TULOKSET SCOTT BOND -MITTAUKSISTA

T-testi (95 % luottamustaso)

Rungon ja taustan välinen konesuuntainen Scott Bond

piste 1 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 2	-2,06	2,10	0,0534
piste 3	0,03	2,11	0,9791
piste 4	1,07	2,10	0,2987
piste 5	1,33	2,10	0,2064
piste 6	0,99	2,10	0,3344
piste 7	0,89	2,09	0,3868
piste 8	2,63	2,10	0,0174
piste 9	2,72	2,10	0,0141

Piste 2 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 3	1,79	2,10	0,0911
piste 4	3,07	2,10	0,0066
piste 5	3,24	2,10	0,0045
piste 6	2,78	2,10	0,0123
piste 7	2,96	2,10	0,0083
piste 8	4,34	2,10	0,0004
piste 9	4,49	2,10	0,0003

Piste 3 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 4	0,86	2,10	0,40
piste 5	1,07	2,10	0,30
piste 6	0,82	2,10	0,42
piste 7	0,66	2,10	0,52
piste 8	2,15	2,10	0,05
piste 9	2,24	2,10	0,04

Rungon ja taustan poikkisuuntainen Scott Bond

piste 1 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 2	-0,70	2,10	0,49
piste 3	-1,20	2,10	0,25
piste 4	-1,94	2,10	0,07
piste 5	-0,48	2,10	0,64
piste 6	0,05	2,10	0,96
piste 7	1,04	2,10	0,31
piste 8	2,56	2,10	0,02
piste 9	1,99	2,10	0,06

Piste 3 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 2	0,65	2,10	0,53
piste 4	-0,57	2,10	0,57
piste 5	0,85	2,10	0,41
piste 6	1,28	2,10	0,22
piste 7	1,90	2,10	0,07
piste 8	3,07	2,10	0,01
piste 9	2,68	2,10	0,02

Piste 4 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 2	1,35	2,10	0,194
piste 5	1,58	2,10	0,133
piste 6	2,07	2,10	0,054
piste 7	2,53	2,10	0,021
piste 8	3,98	2,10	0,001
piste 9	3,44	2,10	0,003

T-TESTIEN TULOKSET SCOTT BOND -MITTAUKSISTA

T-testi (95 % luottamustaso)

Rungon ja taustan välinen Scott bond, kun kone- ja poikkisuuntaiset mittaukset yhdistetään

piste 1 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 2	-2,04	2,02	0,0487
piste 3	-0,87	2,03	0,3874
piste 4	-0,61	2,03	0,5426
piste 5	0,65	2,02	0,5195
piste 6	0,84	2,02	0,4072
piste 7	1,37	2,02	0,1778
piste 8	3,69	2,03	0,0007
piste 9	3,39	2,02	0,0017

piste 3 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 4	0,23	2,03	0,8209
piste 5	1,36	2,03	0,1814
piste 6	1,50	2,03	0,1411
piste 7	1,93	2,03	0,0614
piste 8	3,67	2,03	0,0008
piste 9	3,51	2,03	0,0012

piste 2 eri suuri kuin... (tummennettu)

	t	t kriittinen	p-arvo
piste 3	0,83	2,03	0,411
piste 4	1,10	2,03	0,279
piste 5	2,55	2,02	0,015
piste 6	2,69	2,02	0,011
piste 7	3,19	2,02	0,003
piste 8	5,34	2,03	4,95E-06
piste 9	5,03	2,02	1,22E-05

IGT-MITTAUSTEN EROT PAINATUSNOPEUDELLA 6 m/s,

0-tasona kunkin kohdan pisteen 1 keskiarvo lukuunottamatta taustan ja rungon välillä tapahtuvaa pinnan repeämää, jossa 0-tasona pisteen 2 keskiarvo.

Koepiste 1

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker. väl.-rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,00	0,09	-0,09	-0,17
2.	0,00	-0,45	-0,37	0,09
3.	0,00	0,37	0,45	0,09
ka.	0,00	0,00	0,00	0,00
st.dev.	0,00	0,42	0,42	0,15
poikkisuuntaan				
1.	0,10	0,00	-	-
2.	-0,19	0,27	0,41	0,14
3.	0,10	-0,27	-0,41	-0,14
ka.	0,00	0,00	0,00	0,00
st.dev.	0,17	0,27	0,58	0,20

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten väl. Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	-0,19	-	-
2.	0,10	-	-
3.	0,10	-	-
ka.	0,00	-	-
st.dev.	0,17	-	-
poikkisuuntaan			
1.	0,00	0,27	-
2.	0,29	-0,27	-
3.	-0,29	0,00	0,00
ka.	0,00	0,00	0,00
st.dev.	0,29	0,27	-

Koepiste 2

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker. väl.-rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,29	1,46	1,28	-0,17
2.	0,29	1,18	-	-
3.	0,83	-0,18	-0,09	0,10
ka.	0,47	0,82	0,60	-0,04
st.dev.	0,31	0,88	0,97	0,19
poikkisuuntaan				
1.	0,10	-0,82	-	-
2.	0,68	0,27	0,69	0,42
3.	0,39	-0,55	-0,68	-0,13
ka.	0,39	-0,37	0,01	0,15
st.dev.	0,29	0,57	0,97	0,39

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten väl. Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,10	-	-
2.	0,10	0,00	-
3.	0,39	-	-
ka.	0,19	0,00	-
st.dev.	0,17	-	-
poikkisuuntaan			
1.	0,00	0,27	-
2.	0,29	-	-
3.	0,29	-	-
ka.	0,19	0,27	-
st.dev.	0,17	-	-

Koepiste 3

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker. väl.-rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,56	-0,18	-0,37	-0,18
2.	0,29	0,37	-0,09	-0,45
3.	0,83	1,46	1,00	-0,45
ka.	0,56	0,55	0,18	-0,36
st.dev.	0,27	0,83	0,72	0,16
poikkisuuntaan				
1.	0,10	0,82	0,69	-0,13
2.	0,10	-1,09	-0,96	0,13
3.	0,10	-1,09	-1,23	-0,14
ka.	0,10	-0,45	-0,50	-0,05
st.dev.	0,00	1,10	1,04	0,15

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten väl. Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,10	0,00	-
2.	0,10	-	-
3.	0,10	-	-
ka.	0,10	0,00	-
st.dev.	0,00	-	-
poikkisuuntaan			
1.	0,00	-0,82	-
2.	0,00	-	-
3.	0,00	0,55	-
ka.	0,00	-0,14	-
st.dev.	0,00	0,97	-

IGT-MITTAUSTEN EROT PAINATUSNOPEUDELLA 6 m/s,

0-tasona kunkin kohdan pisteen 1 keskiarvo lukuunottamatta taustan ja rungon välillä tapahtuvaa pinnan repeämää, jossa 0-tasona pisteen 2 keskiarvo.

Koepiste 4

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker.väl -rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	1,10	–	–	–
2.	-0,29	0,37	0,18	-0,18
3.	-0,29	1,18	1,00	-0,17
ka.	0,17	0,77	0,59	-0,18
st.dev.	0,80	0,57	0,58	0,01
poikkisuuntaan				
1.	0,39	0,27	0,13	-0,14
2.	0,39	0,27	0,41	0,14
3.	0,10	0,27	0,13	-0,14
ka.	0,29	0,27	0,22	-0,05
st.dev.	0,17	0,00	0,16	0,16

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten väl. Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,39	–	–
2.	0,10	–	–
3.	0,10	–	–
ka.	0,19	–	–
st.dev.	0,17	–	–
poikkisuuntaan			
1.	0,00	-0,54	–
2.	0,00	0,00	0,00
3.	0,00	0,55	0,83
ka.	0,00	0,00	0,42
st.dev.	0,00	0,55	0,59

Koepiste 5

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker.väl -rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,00	0,09	-0,09	-0,17
2.	0,00	-0,45	-0,37	0,09
3.	0,29	0,64	0,45	-0,18
ka.	0,10	0,09	0,00	-0,09
st.dev.	0,17	0,55	0,42	0,15
poikkisuuntaan				
1.	0,10	-0,82	-0,96	-0,14
2.	0,10	-0,27	-0,41	-0,14
3.	0,39	0,00	0,13	0,13
ka.	0,19	-0,36	-0,41	-0,05
st.dev.	0,17	0,42	0,55	0,16

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,10	-0,27	–
2.	0,39	–	–
3.	0,10	–	–
ka.	0,19	-0,27	–
st.dev.	0,17	–	–
poikkisuuntaan			
1.	0,00	–	–
2.	0,29	0,55	0,56
3.	0,00	0,27	0,83
ka.	0,10	0,41	0,70
st.dev.	0,17	0,20	0,19

Koepiste 6

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker.väl -rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,29	0,09	-0,09	-0,17
2.	0,29	0,91	0,72	-0,18
3.	0,29	0,09	0,18	0,10
ka.	0,29	0,36	0,27	-0,09
st.dev.	0,00	0,47	0,41	0,16
poikkisuuntaan				
1.	0,39	-0,55	-0,68	-0,13
2.	0,10	-0,27	-0,41	-0,14
3.	0,39	0,54	0,41	-0,13
ka.	0,29	-0,09	-0,23	-0,13
st.dev.	0,17	0,57	0,57	0,01

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,10	–	–
2.	0,10	–	–
3.	0,39	–	–
ka.	0,19	–	–
st.dev.	0,17	–	–
poikkisuuntaan			
1.	0,00	–	–
2.	0,00	–	–
3.	0,00	0,27	–
ka.	0,00	0,27	–
st.dev.	0,00	–	–

IGT-MITTAUSTEN EROT PAINATUSNOPEUDELLA 6 m/s,

0-tasona kunkin kohdan pisteen 1 keskiarvo lukuunottamatta taustan ja rungon välillä tapahtuvaa pinnan repeämää, jossa 0-tasona pisteen 2

Koepiste 7

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker.väl -rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,56	-0,18	-0,37	-0,18
2.	0,29	-0,18	-0,37	-0,18
3.	0,29	-0,18	-0,37	-0,18
ka.	0,38	-0,18	-0,37	-0,18
st.dev.	0,16	0,00	0,00	0,00
poikkisuuntaan				
1.	0,10	0,27	0,13	-0,14
2.	0,10	-1,09	-1,23	-0,14
3.	0,39	-0,82	-0,68	0,14
ka.	0,19	-0,55	-0,59	-0,05
st.dev.	0,17	0,72	0,68	0,16

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,39	-	-
2.	0,10	0,56	-
3.	0,39	0,56	-
ka.	0,29	0,56	-
st.dev.	0,17	0,00	-
poikkisuuntaan			
1.	0,29	0,27	0,28
2.	-0,29	-	-
3.	-0,29	-	-
ka.	-0,10	0,27	0,28
st.dev.	0,33	-	-

Koepiste 8

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker.väl -rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,29	0,37	0,18	-0,18
2.	0,00	-0,45	-0,37	0,09
3.	0,56	0,91	0,72	-0,18
ka.	0,28	0,27	0,18	-0,09
st.dev.	0,28	0,68	0,55	0,16
poikkisuuntaan				
1.	0,10	-	-	-
2.	0,39	0,00	-0,14	-0,14
3.	0,10	-	-	-
ka.	0,19	0,00	-0,14	-0,14
st.dev.	0,17	-	-	-

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,10	-	-
2.	0,10	-	-
3.	0,10	-	-
ka.	0,10	-	-
st.dev.	0,00	-	-
poikkisuuntaan			
1.	0,29	-	-
2.	0,00	-	-
3.	0,00	-	-
ka.	0,10	-	-
st.dev.	0,17	-	-

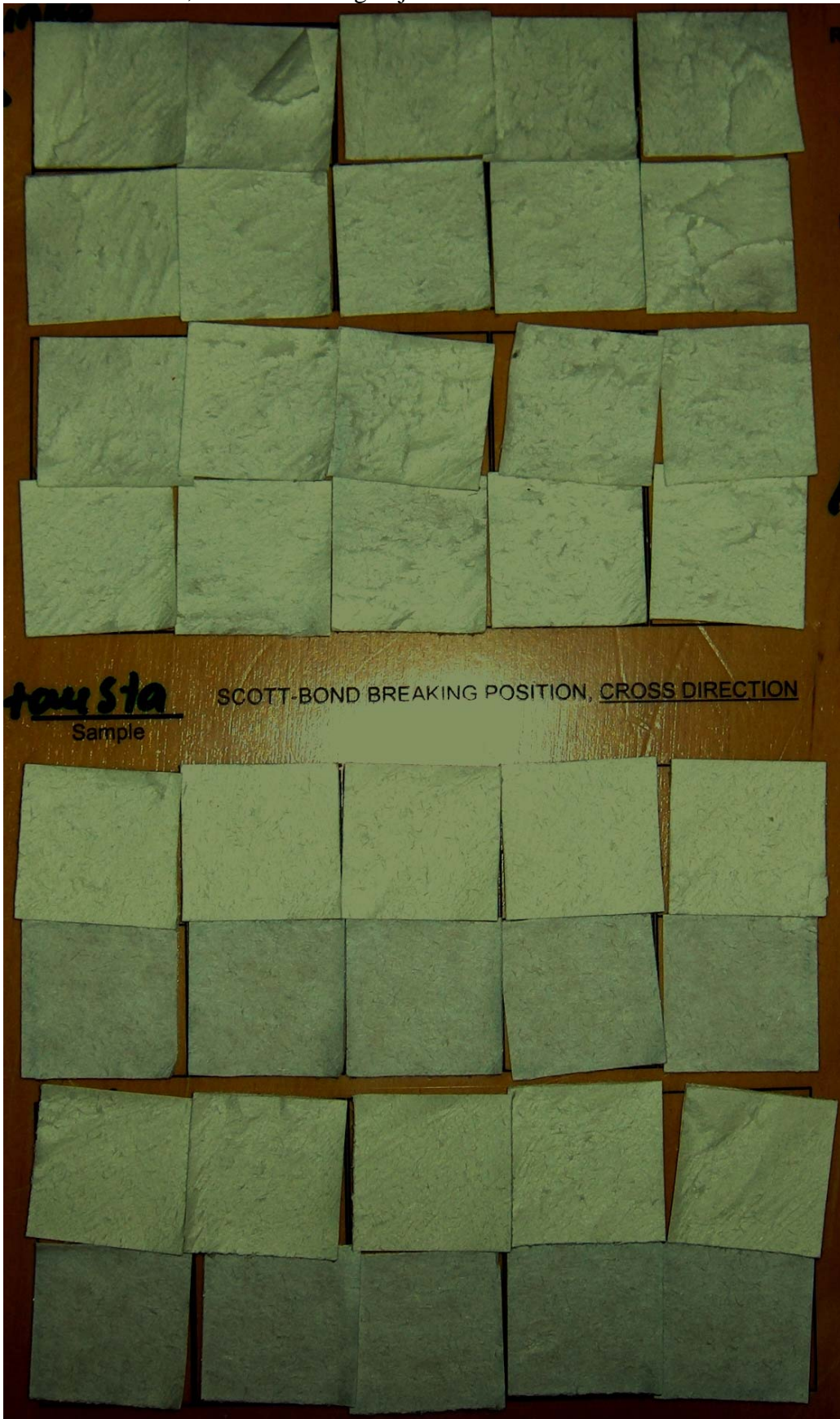
Koepiste 9

painatus pintapuolelle				
konesuuntaan				
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	rep.ker.väl -rep., erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,29	0,37	0,18	-0,18
2.	0,56	0,37	0,18	-0,18
3.	0,29	-0,18	-0,09	0,10
ka.	0,38	0,18	0,09	-0,09
st.dev.	0,16	0,32	0,16	0,16
poikkisuuntaan				
1.	0,39	-1,36	-1,50	-0,14
2.	0,39	-1,36	-1,50	-0,14
3.	0,10	-1,36	-1,23	0,13
ka.	0,29	-1,36	-1,41	-0,05
st.dev.	0,17	0,00	0,16	0,16

painatus taustapuolelle			
konesuuntaan			
	kupruilu, erotus 0- tasosta (m/s)	Pinnan repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)	kerrosten välinen Repeämä, erotus 0- tasosta (m/s)
1.	0,10	-	-
2.	0,10	-	-
3.	0,39	-	-
ka.	0,19	-	-
st.dev.	0,17	-	-
poikkisuuntaan			
1.	0,00	-	-
2.	0,00	0,27	-
3.	0,00	-	-
ka.	0,00	0,27	-
st.dev.	0,00	-	-

NÄYTE SCOTT BOND -HALKEAMASTA

Kuvassa pisteen 1 konesuuntaiset Scott Bond -näytteet, ylemmässä kuvassa pinnan ja rungon välinen halkeama, alakuvassa rungon ja taustan välinen halkeama.



NÄYTE IGT-PALSTAUTUMISNOPEUSMÄÄRITYSTEN LIUSKOISTA

Pinnan puolelle painettaessa näyte, jossa repeäminen edennyt runkokerrokseen (yllä) ja näyte, jossa repeäminen tapahtunut ainoastaan pinnasta (alla). ylempi näyte pisteen 1 toinen konesuuntainen näyte, alempi näyte pisteen 2 toinen konesuuntainen näyte.



Taustan puolelle painettaessa tapahtuvan kupruilun erot pisteiden 1 ja 2 välillä. kuvassa ylempi liuska on pisteen 1 konesuuntainen kolmas näyte ja alempi pisteen 2 konesuuntainen kolmas näyte.

