

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Puunjalostustekniikan osasto

Panu Lahtinen

**PAPERIN OMINAISUUKSIEN YHTEYS RULLAVANAN
ESIINTYMISEEN**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 19.12.2001.

Työn valvoja Professori Jaakko E. Laine

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Teppo Kojo

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Puunjalostustekniikan osasto
Kirjasto

Tekijä Panu Lahtinen	Päiväys 19.12.2001
	Sivumäärä 123
Työn nimi Paperin ominaisuuksien yhteys rullavanan esiintymiseen	
Professuuri Puu-21 Paperitekniikka	Koodi 2071
Työn valvoja Professori Jaakko E. Laine	Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Teppo Kojo
<p>Tämän työn tavoitteena oli pyrkiä selvittämään, mitkä valmiin paperin ominaisuudet ovat rullavanan kannalta merkittäviä ja millä menetelmillä niitä voitaisiin mitata kvantitatiivisesti, jotta niistä johtuvat rullausviat voitaisiin selittää ja välttää. Tarkoituksena oli vahvistaa ja lisätä tietämystä rullaustapahtumasta ja edistää erilaisten profiilien hallintaa ja käyttöä vanaisuuden ja rullarakenteen kannalta.</p> <p>Kirjallisuudessa selvitettiin rullaustapahtumaa sekä rullan rakennetta ja siihen vaikuttavia paperin ominaisuuksia yleisesti. Tässä yhteydessä paneuduttiin rullavanan syntymekanismiin ja sen synnyn mahdollisiin ehkäisymenetelmiin. Lisäksi käsiteltiin paperifysikaalisesta näkökulmasta tärkeimpien paperin rakenne- ja ominaisuusprofiilien yhteyttä rullavanaan sekä paksuusvanan käyttäytymistä nipissä ja eri rullausvaiheissa. Kirjallisuusosan pohjalta päädyttiin valitsemaan tietyt menetelmät analyysien tekoon siten, että tärkeimmät paperin ja konerullan rakennetta tai ominaisuutta kuvaavat osa-alueet voitiin kattaa. Luonnehdinta tehtiin tarkastelemalla sekä rakenne-, ominaisuus- että tilasuureita.</p> <p>Saatujen tulosten mukaan rullavanan ehkäisyn kannalta SC-paperissa on olennaista kuivaneliömassan, paksuuden, kosteuden ja kireyden piikkikyöden sekä rajujen paikallisten profiilimuutosten vähentäminen. Näiden ja muiden mitattujen ominaisuuksien perusteella konerullan halkaisijavaihtelut johtuivat pääosin paperissa olevasta paikallisesta tiheyspoikkeamasta tai suuremmasta neliömassasta. Nämä ilmenivät paperissa joko paksumpina tai vähemmän kokoonpuristuvina kohtina. Kalanteroinnin seurauksena nämä kohdat muuttuivat useimmiten kireydeltään huomattavasti löysemmiksi alueiksi ja niiden haitallisuutta lisäsi normaalia kireämmän kohdan sijainti löysän kohdan välittömässä läheisyydessä.</p> <p>Käytetyistä laboratoriomittausmenetelmistä parhaiten rullavanan kvantitatiiviseen analysointiin soveltui Tapio-analysointilaitteisto. Kokoonpuristumisessa KCL-PURRE -mittalaitteella ei pystytty havaitsemaan merkittäviä eroja poikkisuunnan eri kohtien välillä, mutta syklistä puristuksessa havaittiin pattikohdan suhteellisen palautuvan paksuuden olevan merkittävästi referenssikohtia suurempi. Prosessin tilaa mittaavista menetelmistä luotettavimmaksi analyysityökaluksi osoittautui PAROtester2 -kovuusmittauslaite. Lisäksi IQTension™ -kireysmittauspalkilla pystyttiin saamaan erittäin selvästi esille paikalliset kireyserot, joita ilmenee rullavanojen yhteydessä.</p> <p>Rullavanan havaitsemisen kannalta olisi oleellista tarkastella profiilin muotoparametrien muutoksia. Tämä voisi käytännössä tarkoittaa uusien tunnuslukujen tai esitystapojen käyttöönottoa. Eräs havainnollinen profiilin luonnetta kuvaava ominaisuus olisi jyrkkyysohmien piirtäminen tärkeimmistä ominaisuuksista. Lisäksi rullavanoja koskien eräs mittausteknisesti merkittävä tekijä on karheuden vaikutuksen eliminointi paksuusmittauksessa. Rullalla olevan paperin paksuutta tulisi mitata riittävän paksun pinon avulla ja mieluummin sillä paineella, joka vaikuttaa rullassa.</p> <p>Työssä havaittiin, että rullavanan kvantitatiivinen analysointi on mahdollista olemassa olevilla menetelmillä. Mittausmenetelmien tarkka tunteminen ja eri suureiden samanaikainen tarkastelu on tällöin oleellista.</p>	
Avainsanat patti, rullavana, rullaus, paksuus, kokoonpuristuvuus, neliömassa, kovuus, kireys	Kieli suomi

Author Panu Lahtinen	Date 19.12.2001 Pages 123
Title of Thesis Connection between ridge formation and paper properties	
Chair Puu-21 Paper Technology	Chair Code 2071
Supervisor Professor Jaakko E. Laine	Instructor M.Sc. Teppo Kojo
<p>The purpose of this study was to find out which paper properties cause ridge formation in parent rolls and how to quantify these properties. Based on these measurements one could define which paper properties are the most significant in ridge formation and that would create basis for improving reeling and profile control.</p> <p>In the literature review reeling and roll structure were reviewed in general terms and paper properties that have an effect on roll structure were determined. In this part the origins of ridges and possible preventive means were adduced. Also the connection between ridges and the most essential paper properties profiles and structural profiles as well as the behaviour of ridged paper in the nip and in different reeling stages were reviewed from the physical point of view. On the basis of this review certain measuring methods were selected for the experimental study. These methods were selected so that the most important areas of paper and roll structure or properties characterising them could be covered.</p> <p>According to the results sharp and abrupt local profile deviations of dry basis weight, caliper, moisture and tension are the most obvious reasons for ridge formation and reeling defects with SC paper. Deviations in roll diameter result from density or basis weight variations and these appear as thickness or compressibility variations in paper. After calendering these locations appear in most cases loose and baggy and it is even more harmful when a tight area is next to this loose area.</p> <p>The best measurement method used in this study for the quantitative analysis of ridges and streaks was the Tapio analyser. No clear differences in compressibility between different CD positions could be seen, but in cyclic compression the recoverable thickness of a ridged position was significantly higher when using KCL-PURRE measuring method. The most effective method describing process conditions was PAROtester2 roll hardness tester that correlated well with IQTension™ tension measurement. The resolution of tension measurement was high enough when detecting tension variations arising from streaks in a paper web.</p> <p>When detecting ridges the most essential way is to examine the shape parameters of the profile. One very clear way of characterising the profile is to draw a slope profile from the most important paper properties. Also when measuring caliper it is very important to eliminate the effect of paper surface roughness. The most reliable way of measuring the thickness of wound paper is to measure bulking thickness and the pressure used in measurement should be of the same magnitude present in a parent roll.</p> <p>In this study it was found out that the quantitative analysis of ridges is possible when using existing measuring methods but it requires the knowledge of the measurement techniques and the simultaneous observation of different profiles.</p>	
Keywords ridge, streak, reeling, thickness, caliper, compressibility, basis weight, hardness, tension	Language Finnish

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Metso Paper Oy:lle. Työn ohjaajana on toiminut DI Teppo Kojo ja valvojana professori Jaakko E. Laine Teknillisestä korkeakoulusta. Heidän lisäksi arvokkailla mielipiteillään ja osaamisellaan työn sisältöön ovat vaikuttaneet useat eri henkilöt Metso Paper Oy:n sisällä ja talon ulkopuolella. Heille kiitos kärsivällisyydestä ja mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Erityisen suuren kiitoksen ansaitsee henkilökohtainen mentorini Anssi Kärnä, joka mielipiteillään ja vankalla näkemyksellään on tuonut paljon mielenkiintoisia näkökulmia ja ajatuksia työn sisältöön liittyen. Kiitän myös opiskelutovereitani hauskoista hetkistä ja hyvän yhteishengen luomisesta.

Rakkaalleni, kullalleni.

Järvenpäässä 19.12.2001



Panu Lahtinen

1	JOHDANTO	8
2	RULLAUSTAPAHTUMA	10
2.1	Rullauksen merkitys	10
2.2	Rullauksen hallintasuureet	12
2.2.1	Ratakireys	13
2.2.2	Nippikuorma	14
2.2.3	Kehävoima	15
2.3	Rullaintyyppit	16
2.3.1	Pope –rullain	17
2.3.2	Toisen sukupolven rullaimet	18
2.3.3	Parannetut toisen sukupolven rullaimet	19
2.4	Rullan rakenne	20
2.5	Rullan muodostukseen vaikuttavat paperin ominaisuudet	22
2.5.1	Paksuus	23
2.5.2	Kokoonpuristuvuus	24
2.5.3	Venymä ja elastisuus	24
2.5.4	Kitka	25
2.5.5	Tiheys	26
3	RULLAVANOJEN ILMENEMINEN JA LUONNEHDINTA	27
3.1	Rullavana	28
3.1.1	Käsite	28
3.1.2	Vanojen muodot ja dimensiot	29
3.1.3	Vanojen kvantitatiivinen analysointi	32
3.2	Rullavanan syntymekanismeja	35
3.2.1	Perälaatikon vaikutus paperin vanaisuuteen	36
3.2.2	Paperikoneen kudosten vaikutus paperin vanaisuuteen	42
3.2.3	Paperikoneen telojen ja sylintereiden vaikutus paperin vanaisuuteen	44
3.2.4	Kiillotuskalanterin telojen vaikutus paperin vanaisuuteen	45
3.2.5	Puutteellinen profiilin hallinta	46
3.3	Rullavanan synnyn ehkäisy	47
4	RULLAVANOJEN JA PAPERIN ERÄIDEN RAKENNE- JA OMINAISUUSPROFIILIENTEN YHTEYKSISTÄ	48
4.1	Paksuus	48
4.2	Kokoonpuristuvuus	50
4.2.1	Kokoonpuristuvuuden mallintaminen	53
4.3	Venymä ja elastisuus	56
4.3.1	Paperin dimensiomuutokset vetorasituksessa	58

5	PAKSUUSVANAN PAPERIFYSIKAALINEN TARKASTELU	61
5.1	Paperin deformoituminen kalanteroinnissa	61
5.2	Paperin käyttäytyminen rullausnipissä	63
5.3	Paksuusvanan käyttäytyminen eri tuotantovaiheissa	66
5.3.1	Paperikonelinja	67
5.3.2	Painotalo	68
 KOKEELLINEN OSA		
6	TAVOITE	69
7	MITTAUSMENETELMÄT JA KÄYTETYT MATERIAALIT	69
8	ESIKOKEET	71
8.1	Kokeiden tarkoitus	71
8.2	Esikokeiden suoritus ja tulokset	71
8.2.1	Tapio-analyysit	72
8.2.2	Vetojäykkyys (TSI) ja sen orientaatiokulma (TSO)	75
8.2.3	Ratakireysprofiili	75
8.2.4	Rullan kovuus	77
8.2.5	Lämpötila	80
8.2.6	Kapeiden rullien avulla tehtävät määrittäykset	82
8.3	Johtopäätökset esikokeista	85
9	TUTKIMUSTEN SUORITUS	87
9.1	Koesuunnitelma	87
9.2	Tehdastutkimukset	88
9.2.1	Kovuusmittaukset	88
9.2.2	Lämpötilaprofiilin mittaus konerullasta	88
9.3	Laboratorio- ja pilot-tutkimukset	89
9.3.1	Tapio-analysointori	89
9.3.2	Vetojäykkyyden (TSI) ja sen orientaatiokulman (TSO) määrittäminen ultraäänen avulla	90
9.3.3	Kokoonpuristuvuus	91
9.3.4	Rainan leikkaus osarainoihin	92
9.3.5	Kireysprofiilin mittaus	94
10	TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI	95
10.1	Tapio-analyysit	95
10.2	Paperin kosteus ja lämpötila	100

10.2.1	Kosteus	100
10.2.2	Lämpötila	101
10.3	Vetojäykkyys (TSI) ja sen orientaatiokulma (TSO)	103
10.4	Rullan kovuus	106
10.5	Kokoonpuristuvuus	109
10.5.1	Palautuva paksuus	111
10.5.2	Tulosten sovitukset matemaattiseen malliin	112
10.6	Rainassa esiintyvien pituuserojen kvantitatiivinen määrittely osarainoista	114
10.7	Ratakireysprofiili	116
11	YHTEENVETO	118
12	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA	122
LÄHDELUETTELO		
LIITTEET		

1 JOHDANTO

Tehokkaassa ja taloudellisessa paperin tuotannossa pyritään mahdollisimman tasaiseen ja virheettömään laatuun, niin myös rullauksessa. Konerullauksessa tulee ilmi kuitenkin erilaisia ja eriasteisia vikoja, kuten vanoja, jotka johtuvat useimmiten rullattavan rainan profiilivaihteluista. Nämä rullassa esiintyvät viat saattavat alentaa voimakkaastikin tuotantotehokkuutta sekä aiheuttaa tappioita paperin myöhemmissä käsittely- ja jalostusvaiheissa.

Profiilivaihteluiden tasoittamistarve ja vikojen merkitys korostuvat etenkin tuotantolinjoissa, joissa paperikoneeseen on integroitu monitelakalanterointi. Rullattaessa suuren tiheyden ja alhaisen kokoonpuristuvuuden omaavaa paperia vaikeudet korostuvat. Mikäli profiilivirhe on voimakas, on rullan kokoa rajoitettava, ja pahimmillaan koko linjan tuotanto voi pysähtyä kiinnirullaimeen

Rullan muodostuksen kannalta merkittäviä häiriöitä ovat stabiilit paksuusvanat. Näiden syntyä on tutkittu melko paljon. Konerullassa esiintyvien halkaisijavaihteluiden on todettu aiheutuvan pääosin paikallisesta neliömassa- tai kosteuspoikkeamasta sekä epätasaisesti kuluneesta kalanterin telasta. Rullattaessa profiililtaan epätasaista paperia syntyy muodostuvaan rullaan kireyseroja, jotka aiheuttavat vaihtelua rullan kovuusprofiilissa. Lisäksi on todettu, että halkaisijaerot rullassa eivät synny samassa suhteessa kuin yksittäisistä arkeista voisi päätellä.

Yksittäisiä ominaisuuksia lukuun ottamatta on valmiin paperin monipuolinen analysointi jäänyt suhteellisen vähäiseksi, vaikka vanaisuuden syntymekanismia on tutkittu paljon. Lisäksi empiirisiin havaintoihin perustuvien mielipiteiden kirjo on laaja. Rajoittavia tekijöitä ovat olleet riittävän tarkkojen ja tarkoitukseen soveltuvien mittausten menetelmien vähäisyys sekä epävarmuus ilmiöiden ja niiden seurannaisvaikutusten merkityksestä. Paperin rakenteesta ja ominaisuuksista johtuen eri tekijöiden monimutkaisen osuuden selvittäminen vanojen yhteydessä onkin vaikeaa ja haastavaa.

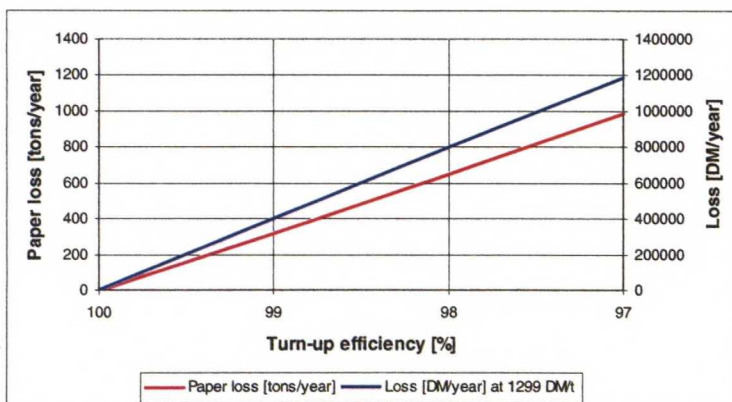
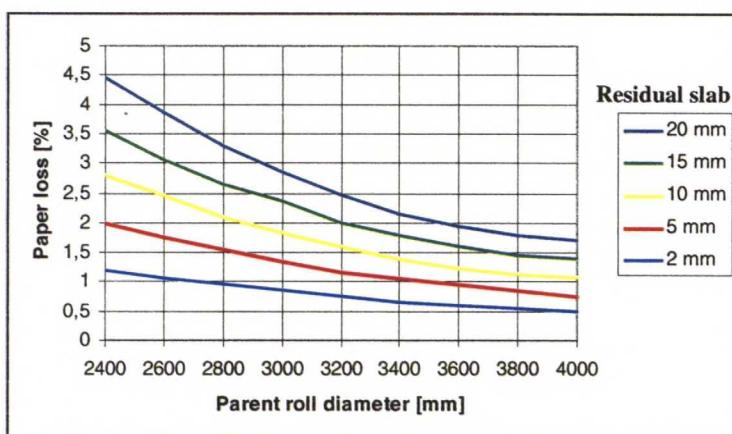
Tämän työn tavoitteena on pyrkiä selvittämään, mitkä paperin ominaisuudet ovat rullavanan kannalta merkittäviä ja millä menetelmillä niitä voitaisiin mitata kvantitatiivisesti, jotta niistä johtuvat rullausviat voitaisiin selittää ja välttää. Tarkoituksena on vahvistaa ja lisätä tietämystä rullaustapahtumasta ja edistää erilaisten profiilien hallintaa vanaisuuden ja rullarakenteen kannalta.

Työssä keskityttiin päällystämättömiin ja voimakkaasti kalanteroituihin lajeihin siksi, että näillä profiilivaihteluiden havaitseminen on helpompaa kuin päällystetyillä lajeilla, joissa päällystekerros tuo mukanaan lisäkompleksisuutta.

2 RULLAUSTAPAHTUMA

2.1 Rullauksen merkitys

Rullaus on olennainen tuotantolinjan tehokkuuteen vaikuttava tekijä. Rullaamalla koneelta tuleva paperi tampo-uritelan ympärille voidaan paperia siirtää ja varastoida helposti suuria määriä kerrallaan laadun siitä suuremmin kärsimättä. Ennen varsinaista loppukäyttöä paperi joudutaan rullaamaan useita kertoja ja mitä useammin paperia rullataan sitä enemmän syntyy tuotannon kannalta turhaa hylkyä ja kustannuksia. Rullauksessa on tavoitteena minimoida hylky ja aikatapit. Kuvassa 1 on esitetty tampo-ururin vaihdon ja konerullan halkaisijan vaikutus tuotantoon ja niiden yhteys taloudellisiin menetyksiin rullauksen yhteydessä.



Kuva 1. Vaihdon tehokkuuden ja konerullan halkaisijan suhteen lasketun tampo-urihyllyn määrän vaikutus tuotannon menetyksiin /1/.

Tehokas tapa tuottaa paperia on leikata pienemmät asiakasrollat suoraan isosta konerullasta. Kasvattamalla konerullan halkaisijaa voidaan linjan tehokkuutta lisätä huomattavasti, jos paperi on laadultaan rullattavissa (kuva 2). Konerullan halkaisijan kasvaessa vaaditaan sen rakenteelta enemmän ja entistä pienemmät profiilivirheet näkyvät rullan pinnassa epätasaisuuksina. Paperin laadun lisäksi rullauksen tehokkuuteen vaikuttavat itse rullaimen toiminta ja käyttöhenkilöstön toimintatavat.



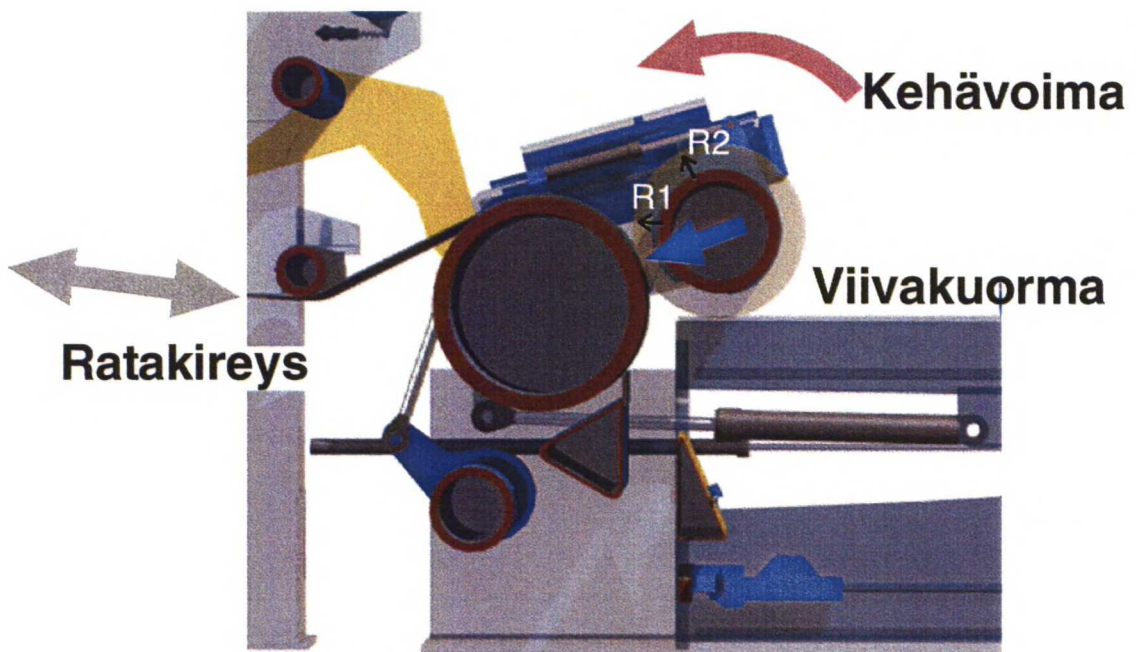
Kuva 2. Konerullan halkaisijan vaikutus linjan tehokkuuteen /2/.

Rullauksen vaatimukset ovat käytännössä pysyneet muuttumattomina siitä lähtien, kun ensimmäiset rullaimet suunniteltiin. Näitä ovat /3/:

- rullattavan paperin laadun säilyttäminen
- turvallisuus
- käyttövarmuus
- rullattavan paperin suuri määrä.

2.2 Rullauksen hallintasuureet

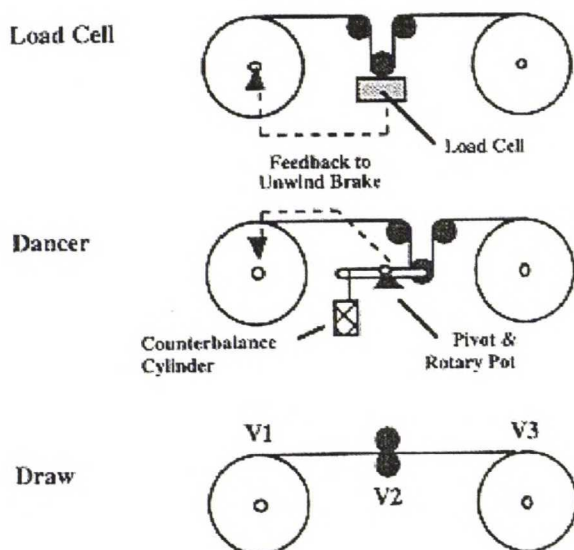
Paperikoneen rullaimella on vähän hallintasuureita verrattuna tuotantoprosessin muihin osiin. Vaikka hallintasuureiden määrä on pieni, voidaan hyväkin paperi pilata huonolla rullauksella. Tämä voidaan kääntää myös päinvastoin eli joskus hyvällä rullauksella voidaan pelastaa huonompikin paperi. Hallintasuureita ovat ratakiureys, nippikuorma ja kehävoima (kuva 3). Näillä hallintasuureilla voidaan vaikuttaa rullan rakenteeseen, lähinnä kovuuteen, mutta paperin rakenteeseen ei juuri voida enää vaikuttaa ainakaan parantavasti. Rullaimella on siis pystyttävä rullaamaan sitä paperia, jota koneelta laatuviiteluineen saadaan. Rullaustapahtumaan ja asiakasrullaan vaikuttavat mm. paperin ominaisuudet, tampoerin koko, sen käsittelytapa ja varastointiaika sekä ajonopeus /4/. Kuvassa 3 viivakuormalla tarkoitetaan nippikuormaa.



Kuva 3. Rullausparametrit /2/.

2.2.1 Ratakireys

Ratakireys määritellään konesuuntaisen voiman keskiarvon suhteena radan leveyteen. Mitä suurempi ratakireys on sitä tiukempi muodostuvasta rullasta tulee ja päin vastoin. Ratakireyden on oltava riittävä, jotta paperirata voidaan tuoda rullaimelle hallitusti. Liian löysä rata muodostaa löysän pussin ja se menettää kosketuksen telapintoihin. Suurella kireydellä vaaraksi muodostuvat ratakatkot. Yleinen nyrkkisääntö, joka soveltuu useille eri materiaaleille, on ajaa paperia kireydellä, joka on 10 – 25 % paperin murtolujuudesta /5/. Kireyden säätö voidaan suorittaa kuormituskennoilla, erillisellä heiluvalla kireydensäätötelalla tai vetoeroilla (kuva 4).



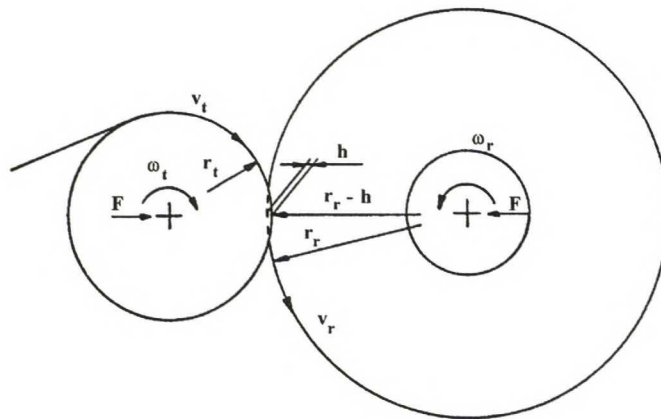
Kuva 4. Kireyden kontrollointi eri mekanismeilla /5/.

Koska paperi on viskoelastinen materiaali, sen venyvyys ja joustavuus pienenevät ajan myötä jännityksen alaisuudessa. Tämän vuoksi on tärkeää, että paperia rullattaessa ratakireys ei nouse liian suureksi, jotta myöhemmissä käsittelyvaiheita ajettavuus ei kärsi. Tuotantolinjassa voi olla useita rullausvaiheita, joissa rata voidaan pilata liian suurella vedolla. Jotkut radan kohdat voivat joutua paikallisesti liian suuren vedon kohteeksi, jolloin elastiset ominaisuudet kärsivät ja rainan pinnan laatu saattaa heikentyä, jos samassa yhteydessä pintaan kohdistuu suuri kokoonpuristava paine. Kerran menetettyä elastisuutta ei enää saada takaisin. Konerullauksessa tai leikkurilla

voidaan tiettyyn rajaan asti sietää profiilivaihtelut ja elastisten ominaisuuksien heikentymiset, mutta potentiaaliset ongelmat eivät häviä. Ne saattavat tulla esiin seuraavassa käsittelyvaiheessa ja ilmetä kohdistusvaikeuksina tai ratakatkoina painotalossa. Suurin vaikutus ratakireydellä on muodostuvan rullan pintaan /4/.

2.2.2 Nippikuorma

Nippikuorma määritellään kuormitussylinterien aikaansaaman voiman suhteena rullaussylinterin ja konerullan muodostaman nipin leveyteen. Nippikuormalla on suurin vaikutus muodostuvan rullan kovuuteen /4/. Nippi aiheuttaa radan venymisen, jota edesauttaa paperirullan kokoonpuristuvuus. Tätä mekanismia havainnollistaa kuva 5. Nipissä vaikuttava nippikuorma saa aikaan rullaussylinterin painumisen konerullan sisään matkan h verran. Tällöin *rullan säde* r_r pienenee ja kehänopeus tällä alueella muuttuu säteen funktiona pienemmäksi. Koska konerullan kulmanopeus pysyy tarkasteluajankohdassa vakiona, kasvaa rainan kehänopeus nipistä ulos tultaessa rullan säteen kasvaessa. Tämä nopeuden nousu johtaa ylimpien paperikerrosten väliseen luistoon ja rainaan aiheutuu *venymä* ϵ . *Painauksen* h suuruus riippuu nippikuormasta, rullaussylinterin ja konerullan halkaisijasta sekä rullan kone-, poikki- ja säteen suuntaisista kimmo-ominaisuuksista /6, 7/. Nipissä tapahtuvia muutoksia ovat tutkineet mm. Pfeiffer /6,7/ ja Koskimies /8/, jotka ovat pyrkineet selittämään rainan kireyden ja ulkoisen voiman vaikutuksia konerullan rakenteeseen.



Kuva 5. Kokoonpuristuminen rullaussylinterin ja konerullan muodostamassa nipissä /9/.

Perinteinen käsitys muodostuvan konerullan uloimman paperikerroksen koneensuuntaisesta jännityksestä (WIT = Wound-in-Tension), on perustunut pelkästään edellä mainitulle nippikuorman aiheuttamalle säteen muutokselle nipissä, mutta myöhemmin selittäväksi tekijäksi on otettu mukaan ratakireys, kitka ja paperin paksuus /5/.

Rullan muodostuksen kannalta on tärkeää riittävä nippikuorman käyttö, jotta konerullan ajettavuus ja käsiteltävyys säilyy. Liian alhaisesta nippikuormasta johtuen rulla saattaa kaatua tai sen pinta irrota rullaa siirrettäessä. Korkea nippikuorma puristaa rataa kasaan nipissä ja tampuurin sisällä, jolloin erityisesti bulkkisilla paperilajeilla menetetään turhaan paksuutta. Nippi ei myöskään saa ruhjoa paperia. Tampuurin pohjalla suuremman nippikuorman käyttö on perusteltua, jotta pohjasta saadaan riittävän tiukka. Nykykäsityksen mukaan tiukka pohja on edellytys hyvän rullan muodostumiselle. Tämä lisää kuitenkin plastisen muodonmuutoksen todennäköisyyttä lähellä konerullan pohjaa, mikä saattaa vaikeuttaa rullan jatkokäsittelyä. On myös todettu, että rullaussylinterin ja konerullan välinen nippi ei ole suora, vaan kuormitus on nykyisillä laitekonstruktiolla reunoilla suurempi. Tämä johtuu kuormitustavasta ja tampuuritelan taipumasta /2, 5/.

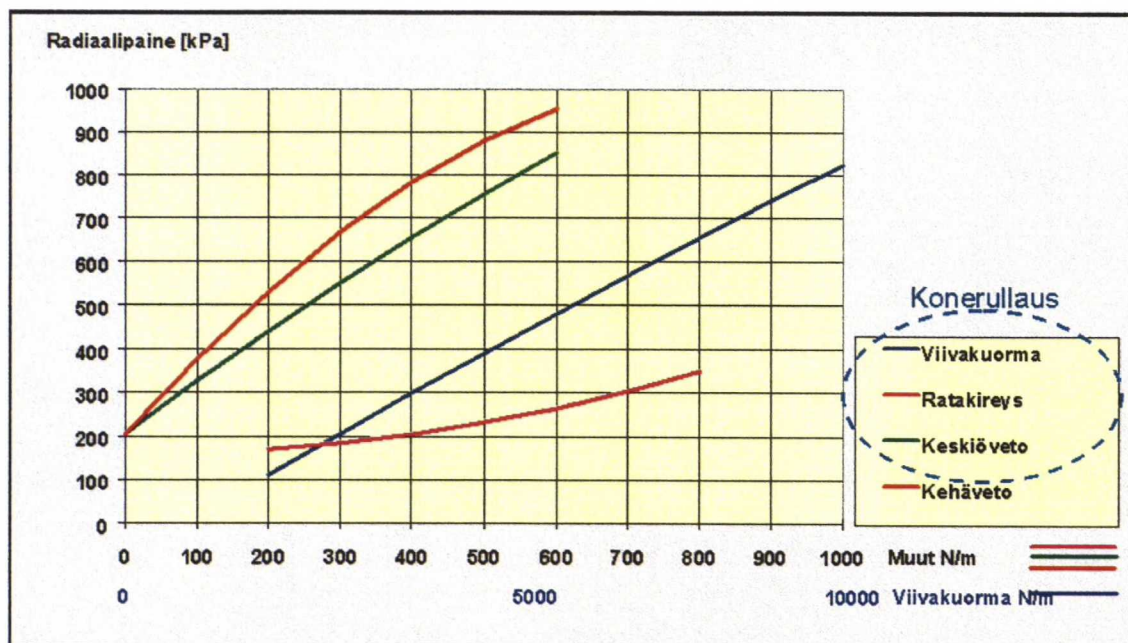
Monissa yhteyksissä on suuren nippikuorman todettu aiheuttavan tai pahentavan tyypillisiä rullausvikoja, kuten rynkkyjä, repeämiä ja poimutusta. Tämän vuoksi pyritään yhä pienemmän nippikuorman käyttöön.

2.2.3 Kehävoima

Keskiökäyttöisissä rullaimissa pystytään keskiökäytön momentilla vaikuttamaan rullan muodostukseen kehävoiman avulla. Tampuurin kautta pintaan välittyvällä voimalla pystytään venyttämään rataa rullan pinnassa ja se mahdollistaa myös laajemman nippikuorma-alueen käytön /2/. Kehävoima on rullan pinnassa vaikuttavan momentin suhde radan leveyteen.

Keskiökäytön avulla saavutetaan parempi rullan rakenne ja myös rullausvikojen synty vähenee, koska rullaus voidaan suorittaa pienemmällä nippikuormalla kuin ilman

keskiökäyttöä. Myös rullaussylinterin ja konerullan välinen luisto saadaan eliminoitua. Tiukan pohjan muodostuksessa käytetään suurempaa momenttia ja halkaisijan kasvaessa sitä vähennetään. Kuvassa 6 on vertailtu eri rullausparametrejä keskenään.



Kuva 6. Eri rullausparametrien vertailu /2/.

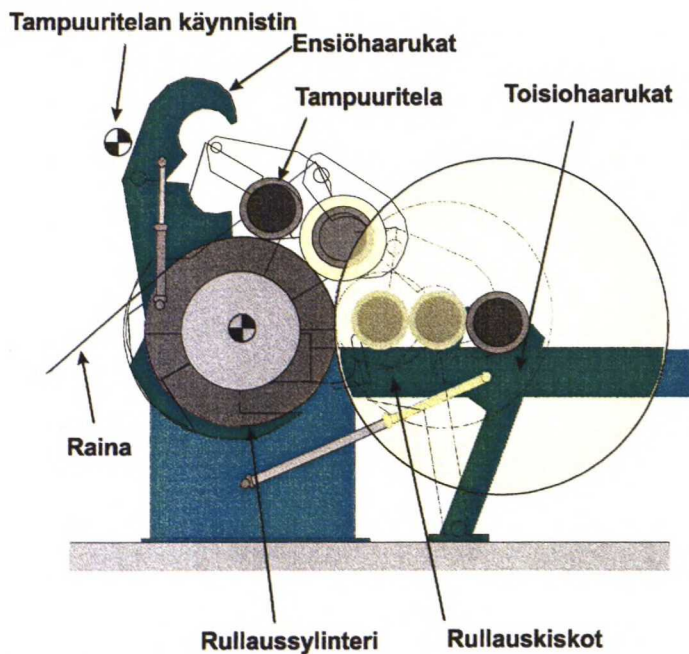
2.3 Rullaintyytit

Rullainten kehitys oli pitkään paperikoneen keksimisen jälkeen lähes samalla tasolla, kunnes 1920-luvulla koettiin ensimmäinen varsinainen muutos rullainkonstruktiossa. Tämä ns. ensimmäisen sukupolven rullain nimettiin keksijänsä mukaan Pope-rullaimeksi, joka on tänäkin päivänä yleinen rullaintyyppi monilla paperikonelinjoilla. Pope -rullaimen jälkeen seuraava isompi kehitysaskel tapahtui vasta 1990-luvulla, jolloin mittavan, jo -80-luvulla alkaneen, kehitystyön tuloksena markkinoille ilmestyi toisen sukupolven rullainkonstruktio kasvavan paperintuotannon tarpeisiin. Nykyisin käytössä olevia toisen sukupolven rullaimia ovat mm. Metson OptiReel™, Voithin Sirius™ ja entisen Beloitin TNT™ -rullain. Kehitystä on jatkettu tämän jälkeen ja markkinoille on tullut entistä suorituskykyisempiä rullaimia. Nämä rullaimet ovat paranneltuja versioita toisen sukupolven rullaimista, kuten Metson OptiReel Plus™.

2.3.1 Pope –rullain

Ensimmäisen sukupolven rullain perustuu pelkästään kehävetoiseen rullainkonstruktioon /3/. Tässä mallissa käyttö on ainoastaan rullaussylinterissä, jota vasten konerullaa painetaan (kuva 7). Paperia siis rullataan tampuuritelan ympärille ja tampuuritelaa kuormitetaan sen päistä haarukoilla halutun nippikuorman aikaansaamiseksi. Ensiö- ja toisiohaarukoiden käyttö on perusta myös nykyisille rullainkonsepteille.

Verrattain suurten tuotantotappioiden ja koneiden nopeuden nousun myötä Pope –rullain on muodostunut tuotantoa rajoittavaksi tekijäksi. Pope –rullaimen haittapuolia ovat tampuuritelan keskiökäytön puuttuminen, suuri nippikuorman taso ja huono nippikuorman kontrollointi /11/. Huomattava osa tuotannon hävikistä syntyy pinta- ja pohjahylystä, joka aiheutuu lähinnä riittämättömästä tampuurin vaihdon hallinnasta.



Kuva 7. Pope –rullain /2/.

2.3.2 Toisen sukupolven rullaimet

Paineet rullakoon kasvattamiseksi ja tuotantotehokkuuden parantamiseksi johtivat uuden rullaintyyppin kehittämiseen. Päämääräksi asetettiin nimenomaan rullauksesta aiheutuvien kustannusten minimointi /11/. Toisen sukupolven rullainten kehityksessä on tukeuduttu seuraavaan paranneltuun tekniikkaan /10/:

- tarkka nippikuorman hallinta alusta loppuun
- keskiökäytön hyväksikäyttö
- paranneltu tampuurin vaihtotapa
- ratakireyden hallinta
- käyttäjän ja ylläpidon kannalta helppo ohjausjärjestelmä.

Uusien konseptin myötä on saavutettu selviä etuja aikaisempaan tekniikkaan verrattuna ja vaikka eri koneenrakentajien konseptit poikkeavat hieman toisistaan, on saavutettu tehokkuuden parannus koko paperikonelinjalla tapauksesta riippuen n. 5 - 11 % ja pelkästään konerullaimella yli 1 % (Taulukko 1). Myös rullaimen vaihtohyötysuhde, joka on onnistuneiden vaihtojen suhde kaikkiin vaihtoihin, on parhaimmillaan jo yli 99 % /11, 12/. Pinta- ja pohjahylyn määrää on saatu vähennettyä ja konerullan halkaisijaa voidaan kasvattaa lähes neljään metriin.

Taulukko 1. Toisen sukupolven rullaimen vaikutus tuotantotehokkuuteen. Laskelmat perustuvat LWC- ja SC-linjoilta saatuun tietoon /11/.

PM reel change	Second generation reel	Traditional reel
Change efficiency	> 99 %	< 96 %
Reel diameter	3,7 m	2,8 m
Lost production	< 0,1 %	> 1,1 %

Selvimmän eri valmistajien konsepteista poikkeava entisen Beloitin TNT™ -rullain, jossa ei ole ensiö- ja toisiohaarukoita. Tampuuritela pysyy samalla tasolla vaihtohetkestä konerullan valmistumiseen saakka /12, 13/. Tämän mahdollistaa pystysuoraan

liikuteltava rullaussylinteri, joka mahdollistaa rullauksen tietyssä kulmassa. Voithin ja Metson konseptit ovat puolestaan melko samankaltaisia. Ehkä selvin ero on siinä, että Voithin rullaimessa nippikuorma säädetään rullaussylinterin horisontaalisella liikkeellä, kun taas Metson versiossa nippikuorma säädetään perinteisesti tampuuritelan päitä kuormittamalla /14/.

2.3.3 Parannetut toisen sukupolven rullaimet

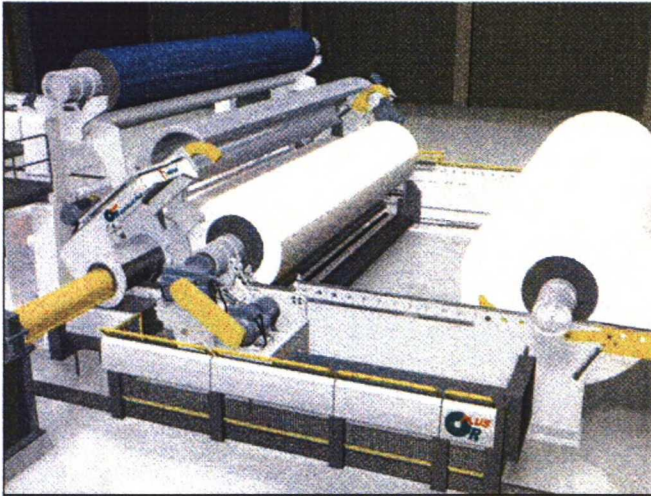
Uusimmat rullaimet ovat paranneltuja versioita toisen sukupolven rullaimista (kuva 8). Kehitystyötä on jatkettu etenkin vaihtohyötysuhteen parantamiseksi. Seuraavassa on lueteltu muutamia Metson paranneltuun toisen sukupolven rullaimeen (OptiReel Plus™) tehtyjä muutoksia /11/:

- Rullaus tapahtuu vain kiskoilla. Konerullan siirtäminen kiskoja pitkin tapahtuu erillisillä siirtokelkoilla. Tällä tavoin pyritään minimoimaan laakeripesän pyörimisestä aiheutuva kitka.
- Vaihto rullaussylinterin ollessa auki. Täysi konerulla siirretään irti rullaussylinteristä ja tyhjä tampuuritela lasketaan tilalle ensiöhaarukoilla. Vaihtotilanteessa valmistuvan konerullan pinta pyritään pitämään kireänä erityisellä painotelalla, joka painetaan kiinni rullan alapintaan.
- Paranneltu ohjaushydrauliikka ja nippikuorman mittaus.
- Radanohjain ohjaa kokoleveän radan uudelle tampuuritelalle.

Parannetulla kuormitusmekanismilla ja konerullan liikuttamisella pystytään kontrolloimaan paremmin nippikuormaa ja konerullan kovuus pystytään minimoimaan entistä helpommin, jotta paperin ominaisuudet eivät kärsisi. Myös samassa tasossa tapahtuva rullan rakentaminen tarkoittaa sitä, että ns. taittokulma on kokoajan vakio. Taittokulma on verrannollinen siihen kaaren pituuteen, jonka rullaussylinterin kanssa kosketuksessa oleva paperiraina muodostaa. Jos rata kulkee riittävän matkan rullaussylinterin pinnalla ennen rullalle menoa, ratakireys ei enää vaikuta nippikuormaan, kuten pienellä taittokulmalla käy /14/. Koska ratakireys vaikuttaa

nippikuorman, vaihtelut ratakireydessä aiheuttavat myös epätasaisen nippikuorman, mutta vaikutus ei ole kovin merkittävä käytännön rullaustapahtumassa.

Uusien rullainten yhteyteen on myös asennettu kireysmittausjärjestelmä, joka tarjoaa mahdollisuuden entistä tasaisemman kireysprofiilin muodostamiseen. Kireys mitataan radan ja mittapalkin väliin muodostuvan ilmafilmin aiheuttamasta paineesta erityisellä leijuntalistalla, jonka kaupallinen versio on nimeltään IQTension™ /11/. Mittaus on kontaktiton ja sen avulla saadaan kireysprofiili koko radan leveydeltä ilman skannausta nopeasti ja tarkasti.



Kuva 8. Metson paranneltu toisen sukupolven rullain OptiReel Plus™ /2/.

Paperikoneiden parannetut toisen sukupolven rullaimet on ennen kaikkea tarkoitettu leveille koneille ja suurille konerullan halkaisijoille. Tätä kautta voidaan rullauksessa syntyvää hukkaa vähentää, mutta toisaalta rullaustapahtuma tulee yhä kriittisemmäksi linjan tehokkuuteen vaikuttavaksi tekijäksi varsinkin yleistyvän on-line –päällystys- ja kalanterointiteknologian myötä.

2.4 Rullan rakenne

Tuotantolinjan tehokkuuden kannalta oikea rullan rakenne on ensiarvoisen tärkeä. Hyvä konerulla on dimensioiltaan asianmukainen, eikä siinä tule olla rullausvikoja. Rullan

rakenteeseen voidaan vaikuttaa säätelämällä rullausparametrejä rullattavan paperin ja rullan halkaisijan mukaan. Pfeifferin mukaan pituusleikattavan rullan rakenne riippuu neljästä eri parametristä: koneensuuntaisesta vetomoduulista, paperin kitkakertoimesta, rullauskireyden hallinnasta ja paperin kokoonpuristuvuudesta /15/. Käytännössä rullan ominaisuudet näkyvät rullan käyttäytymisessä myöhempien prosessivaiheiden aikana. Onnistunut rullaus vaatii lisäksi ominaisuuksiltaan tasaisen paperirainan ja moitteettomasti toimivat toimilaitteet.

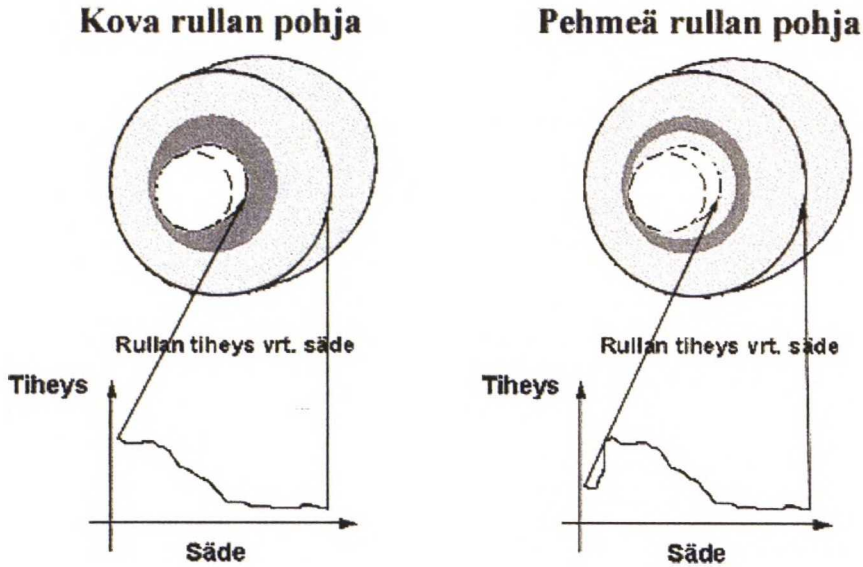
Toistaiseksi paras rullan rakennetta kuvaava mitta on ollut rullan kovuus /5, 16/. Kovuusprofiilien ja prosessista saatavien profiilien keskinäisillä korrelaatioilla voidaan selittää merkittävimmät rullan rakenteessa tapahtuvat vaihtelut.

Rullan rakenteen muodostuksessa pätee nykyään kolme perussääntöä: tiukka pohja, mahdollisimman löysä pinta ja tasaisesti kohti pintaa laskeva kovuus säteen suunnassa. Ensiksi riittävän tiukalla pohjalla luodaan perusta hyvälle rullan käsiteltävyydelle. Eräs tutkimus osoitti, että suuri määrä painatuksessa esiintyvistä ongelmista löytyy rullista, jotka on leikattu pohjamuutosta eli lähimpänä tampuuritelaa /3/. Toisaalta liian löysä pohja saattaa johtaa rullan teleskopisoitumiseen. Joissain tapauksissa rulla rakennetaan löysälle pohjalle, kun käytössä ovat vanhat, liian heikot tampuuritelat tai prosessissa on jokin häiriö. Löysän pohjan päälle rullaus jatkuu tiukkana kuten kuvasta 9 käy ilmi. Toiseksi pinta ei saa olla liian tiukka, jotta alla olevat kerrokset eivät vahingoitu. Tällöin kireä pinta johtaa alimpien kerrosten vahingoittumiseen ja tulos näkyy kasaanmenona ja rynkkynä. Kolmanneksi rullauskireydessä ei saa tapahtua äkillisiä muutoksia pohjalta pintaa kohti siirryttäessä. Äkilliset muutokset rullausparametreissa aiheuttavat radan luistamisen rullassa tai esimerkiksi ns. tähtikuvion muodostumisen rullan päätyyn, mikä vaikeuttaa rullan ajettavuutta myöhemmässä vaiheessa aiheuttaen pahimmillaan ratakatkon /4, 5/.

Rullan rakenteeseen vaikuttaa rullauskireyden ja rullattavan materiaalin lisäksi myös tampuuritela. Koneiden leventyessä ja konerullien halkaisijoiden kasvaessa tampuuritela tulee mitoittaa siten, että rullan sisäiset voimat eivät kasva liian suuriksi ja vaikeuta

rullan muodostusta. Lisäksi eräs vaihtoehto on käyttää materiaaleja, joilla saadaan aikaan jäykempi tela.

Rullan rakentamistavat



Kuva 9. Rullan rakentaminen /7/.

2.5 Rullan muodostukseen vaikuttavat paperin ominaisuudet

Edellytykset mahdollisimman tasalaatuisen konerullan muodostamiseksi riippuvat pitkälti rullattavan paperin ominaisuuksista. Kireysvaihteluista johtuen vaaditaan radan kuljettamiseksi tietty minimijännitys, jotta radan hallittu tuominen rullaimelle onnistuu. Mitä suurempi on poikkisuuntainen vaihtelu rainassa sitä suurempi ratakireys vaaditaan /17/. Taulukoon 2 on listattu paperin eri ominaisuuksien vaikutuksia rullauksessa esiintyviin ongelmiin.

Voidaan sanoa, että paperista aiheutuvat rullausongelmat johtuvat lähes aina paikallisista profiilivaihteluista. Nämä vaihtelut ovat pääasiassa lähtöisin paperikoneen alkupäästä. Tässä kohdassa on syytä mainita, että rullauksessa esiintyvät ongelmat ja niiden syntymekanismit ovat hyvin yksilöllisiä ja ne riippuvat selvästi paperilajista ja

paperin eri käsittelyvaiheista. Selvimmin paikallisiin profiilivaihteluihin vaikuttavat päällystys- ja kalanterointitapahtumat.

Taulukko 2. Rullaukseen vaikuttavat paperiradan ominaisuudet /2/.

Ominaisuus	Häiriön vaikutus rullauksessa
Paksuus	Profiilivirheet, nippivaikutus
Kokoonpuristuvuus	Profiilivirheet, nippivaikutus, kovuustaso
Pituus	Profiilivirheet, rynkyt
Venymä, elastisuus	Nippivaikutus, kovuustaso, katkoherkkyys, levitys
Ilmanläpäisy	Sivuheitot, teleskooppisuus, ilmarynkyt, kitka
Kitka	Kovuustaso, rynkyt, levitys
Tiheys	Rullan massa, nippivaikutus
Jäykkyys	Rynkyt, levitys

2.5.1 Paksuus

Jos ajatellaan asiaa teoriassa, niin paperissa oleva 1 µm:n paksuusero radan poikkisuunnassa aiheuttaa 1 cm:n halkaisijaeron rullan pintaan, jos kerroksia rullassa on 10 000. Käytännössä halkaisijaero on pienempi johtuen voiman epätasaisesta jakautumisesta rullausnipissä. Ne paksut kohdat, jotka aiheuttavat konerullaan halkaisijaeron, rullautuvat myös muita kohtia kireämmälle. Paksumpi kohta joutuu rullaustilanteessa rullaussylinterin ja tampoerin muodostamassa nipissä kovemman puristuksen kohteeksi kuin sen vieressä oleva kohta. Virheet paksuusprofiilissa eivät siis johda konerullan pinnalla olevien poikkisuuntaisten halkaisijaerojen muodostukseen samassa suhteessa kuin yhden arkin paksuusmittauksen perusteella voisi olettaa /18/.

Paksuuden merkitys korostuu entisestään raskaasti kalanteroiduilla lajeilla, sillä suuresta tiheydestä ja alhaisesta kokoonpuristuvuudesta johtuen paksuusvaihteluiden tasoittaminen on paljon vaikeampaa kuin bulkkisilla lajeilla.

2.5.2 Kokoonpuristuvuus

Kokoonpuristuvuuden merkitys riippuu paperilajista. Sen merkityksen tutkiminen on jäänyt melko vähälle huomiolle, mutta markkinoiden ja paperilajien kehittyminen on johtanut sen tärkeyden korostumiseen. Varsinkin syväpainolajeilla kokoonpuristuvuus on tärkeä ominaisuus ja kierrätyskuidun käytön yleistyminen ovat osaltaan vaatineet huomion kiinnittämistä paperin z-suuntaisiin ominaisuuksiin.

Lähes kokoonpuristumattomia materiaaleja rullattaessa kasvaa rullan säde yksittäisen kerroksen paksuuden mukaan. Huokoisempien materiaalien kohdalla poikkisuuntaiset halkaisijaerot saattavat johtua enemmän konesuuntaisesta jännitysvaihtelusta kuin paksuusvaihtelusta /18/. Kokoonpuristuvuuden merkitys rullan muodostuksessa näkyy ennen kaikkea rullan kovuustasossa, johon vaikuttaa paperin käyttäytyminen rullaussnipissä.

2.5.3 Venymä ja elastisuus

Kuten jo mainittu, radan hallinta rullaimella vaatii tietyn minimijännityksen, jotta rullaus onnistuu. Tämä tarkoittaa myös käytännössä sitä, että raina tulisi pitää niin kireällä, että siinä olevat löysät kohdat suoristuvat ilman, että ennalta jo kireät kohdat vaurioituvat. Rainassa olevista poikkisuuntaisista kireyseroista johtuen jotkut kohdat joutuvat suuremman venytyksen kohteeksi kuin toiset ja tämä venymä voi olla luonteeltaan pääasiassa joko palautuvaa (elastista) tai palautumatonta (plastista).

Paperirainalla voidaan sanoa olevan pituusprofiili poikkisuunnassa. Tätä pituusprofiilia voidaan kuvata myös plastisen ja jähmettyneen venymän avulla ja sen vaikutus rullan muodostukseen on olennainen tekijä rullauksessa. Plastinen venymä on dominoivassa asemassa kiillotuskalanterilla, kun taas jähmettynyt venymä syntyy lähinnä paperikoneella paperia kuivattaessa. Se on paperin vapaan kutistuman ja kuivatuskutistuman välinen erotus. Osa tästä jähmettyneestä venymästä johtuu relaksaatiosta, joka ilmenee ajan myötä selvimmin rullan pintakerroksissa paperin ollessa rullalla. Esimerkiksi kohtaan, jonka paksuus tai kuivaneliömassa on suurempi, syntyy rullauksessa suurempi tampoerin säteensuuntainen paine, joka johtaa

konerullassa myös pintakerrosten tangentiaalisen jännityksen kasvamiseen. Paperin viskoelastisesta luonteesta johtuen tällaisen kohdan palautuva venymä muuttuu ajan myötä palautumattomaksi venymäksi paperin ollessa jännityksen alaisena.

Paperin venymä vaikuttaa rullan kovuustasoon, sen levitykseen ja tätä kautta myös muodostuviin rullausvikoihin. Jos ratakireys on liian alhainen, saattaa tuloksena olla kreppiryngkyä tai jos ratakireys on liian suuri, rullan sisällä syntyy repeämiä. Pituusleikkauksessa suuremman venymän kokeneeseen kohtaan voidaan kuvitella rullausnipissä kerääntyvän tavaraa nipin sisääntulon kohdalle, jos kiinnirullauksessa ei tapahdu luistoa ja rainan jokaisessa kohdassa nopeus nipissä on sama.

2.5.4 Kitka

Paperin kitkalla on ratkaiseva merkitys muodostuvan rullan kireystason muodostumiseen sekä rullan sisäisiin jännityksiin. Etenkin paperi/paperi –kitka vaikuttaa rullauksessa kerrosten liukumiseen toistensa suhteen ja paperin deformatumiseen.

Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (VTT) suoritettujen projektin yhteydessä on tutkittu kitkan merkitystä rullautuvuudelle ja siihen liittyviin ongelmiin /19/. Von Hertenin /19/ tutkimusten yhteydessä on ilmennyt, että paperin kitkalla ja bulkilla näyttäisi olevan yhteyttä paperirullien ajettavuuteen. Kriittisellä tasolla liikuttaessa pienetkin kitkavaihtelut vaikuttavat kerrosten väliseen liukumiseen ja suuresta paikallisen lepo- ja liikekitkakertoimen erosta johtuen paperikerrokset liukuvat epätasaisesti toisiinsa nähden. Tämä saattaa johtaa mm. kreppiryngyn tai repeämien muodostumiseen /5/.

Kitkakertoimen luotettava määrittäminen on monesti hankalaa ja varsinkin eri menetelmillä mitattujen tulosten hajonta on yleensä suuri. Kitkakertoimella on optimialue, joka mahdollistaa rullauksen ilman lisääntyviä ongelmia /17, 18/. Kirjallisuuden ja kitkatutkimusten mukaan rullan muodostuksen kannalta on edullista, että lepo- ja liikekitka on korkea ja sen hajonta sekä ero liikekitkaan on pieni /5, 19/. Von

Hertzenin tulokset vahvistavat käsitystä, jonka mukaan alhaisen bulkin omaavilla papereilla kitkakertoimen tasolla on merkitystä rullaustulokseen. Toisin sanoen heikosti ilmaa läpäisevillä, ohuilla ja tiiviillä papereilla, joilla on alhainen kitkakerroin, ovat rullausongelmat herkempiä. Tyypillisiä ilmiöitä ovat rynkkyjen lisäksi mm. sivuttaissiirtymät ja teleskooppisuus.

2.5.5 Tiheys

Rullan muodostuksessa selvin vaikutus tiheydellä on rullan massaan. Tämä on vanhemmilla rullaustekniikoilla jopa rajoittava tekijä rullakoon kasvattamiseksi. Varsinkin pituusleikkauksessa kantotelaleikkureilla muodostuu nippipaine rullan oman painon vuoksi helposti suureksi ohuilla ja tiheillä lajeilla. Myös konerullauksessa tiheillä ja sileillä lajeilla joudutaan käyttämään melko korkeaa nippikuormaa, jotta konerulla saadaan pysymään kasassa.

Kuten jo edellisessä kappaleessa mainittiin, tiheillä lajeilla rullaustapahtuma on selvästi ongelmallisempi kuin bulkkisilla lajeilla, joiden jäykkyys on myös suurempi. Tiheillä ja kokoonpuristumattomilla papereilla poikkisuuntainen paksuusprofiili vaikuttaa normaalia selvemmin rullan muotoon. Tiheät ja paksut kohdat joutuvat myös rullaussylinterin ja konerullan välisessä nipissä suuremman puristuspuheen kohteeksi ja tuloksena on kova kohta rullassa. Rullavioista rynkkyt ja repeämät ovat yleisiä varsinkin lähellä pohjaa, kun rullataan halkaisijaltaan suuria rullia pienille teloille /5/. Paperin jäykkyyden kasvaessa näiden vikojen ilmeneminen vähenee.

Erityisesti tiheillä ja heikosti ilmaa läpäisevillä lajeilla esiintyvä ongelma on pussitus. Ilmapussit voivat muodostua sekä konerullan että rullaussylinterin puolelle ja niitä syntyy sitä herkemmin mitä suurempi on ajonopeus /4/. Ilmapussin syntyä edesauttaa epätasainen nippikuorma, joka on konerullan päissä suurempi kuin keskellä. Tällöin rullausnipin eteen kerääntynyt ilma pääsee keskeltä helpommin konerullan sisään muodostaen ilmapussin konerullan uloimman kerroksen ja tulevan radan väliin. Mikäli ilma pääsee poistumaan konerullan päistä, sen sanotaan olevan hallittu pussi. Jos ilma ei pääse hallitusti ulos, aiheuttaa pussi nippiin kaatuessaan rynkkyä /2/.

3 RULLAVANOJEN ILMENEMINEN JA LUONNEHDINTA

Monet rullaviat ovat silmännähtäviä eikä erityistä instrumenttia välttämättä tarvita /20/. Rullan visuaalisella tarkastelulla saatetaan erottaa viat jopa paremmin kuin useimmilla rullan rakennetta mittaavilla laitteilla. Voidaan sanoa, että prosessi- ja laboratoriomittalaitteilla tuetaan rullan visuaalista tarkastelua. Monesti ihmisen näkö-, kuulo-, ja tuntoaisti yhdessä ovat kuitenkin nopein ja varmin tapa havaita rullatun paperin vikoja.

Perinteinen menetelmä kovuusvaihteluiden havaitsemiseksi ja rullan rakenteen tutkimiseen on ollut ns. paperimiehen kapula, jolla työntekijä on koputellut konerullan kylkeen tutkiakseen rullan rakennetta. Tunnustelun ja kopautuksesta syntyvän äänen sekä paperimiehen osaamisen ja kokemuksen perusteella on päätetty, tarvitaanko säätötoimenpiteitä paperin paksuusprofiilin korjaamiseksi. Korjaavia toimenpiteitä voivat olla esimerkiksi perälaatikon huulen säätö tai kalanterilla nippikuorman profilointi /21/. Vaikka tämä menetelmä on käytännöllinen, se ei ole yhdenmukainen ja tarkka, eikä se anna kvantitatiivista mittaa vaihtelun suuruudesta. Ilman kvantitatiivista lähestymistapaa ei pystytä ratkaisemaan kaikkia rullan rakenteeseen liittyviä ongelmia. Prosessin syvällinen ja yksityiskohtainen ymmärtäminen on edellytys paremman lopputuloksen kannalta – myös rullan muodostuksessa.

Rullavikojen havainnoinnissa tulee myös ottaa huomioon, että viat voivat muodostua rullan eri kohdissa, ne voivat olla kasautuvia ja aikatekijä vaikuttaa vian syntyyn ja suuruuteen. Sen vuoksi rullan yksittäinen tarkastus ei välttämättä riitä alkavan vian havaitsemiseksi vaan rullaa täytyy seurata alusta loppuun. Perinteinen ja toistaiseksi paras rullan rakennetta kuvaava mitta on ollut rullan kovuus johtuen osittain sen helpposta määrittämisestä. Kovuusmitta ei kuitenkaan ole perimmäinen rakenteellinen parametri, koska se ei kerro riittävästi paperin tilasta. Alan tutkijoiden keskuudessa näyttää olevan yhteinen kanta, jonka mukaan paperin voima-venymä –tunnussuureilla voidaan kvantitatiivisesti kuvata rullan rakennetta ja vikoja /22/.

3.1 Rullavana

3.1.1 Käsite

Rullavana on käsitteenä hyvin monimuotoinen ja sillä kuvataan usein hyvinkin erilaisia rullassa esiintyviä ilmiöitä. Käsitteelle on olemassa useita synonyymejä tai lähes samaa ilmiötä kuvaavia termejä, joista yleisimpiä ovat patti, panta, juovaisuus tai profiilivika¹. Näistä patti ja panta käsitteitä käytetään lähinnä puhuttaessa konerullassa esiintyvistä poikkisuunnan halkaisijavaihteluista, joihin tässä työssä keskitytään.

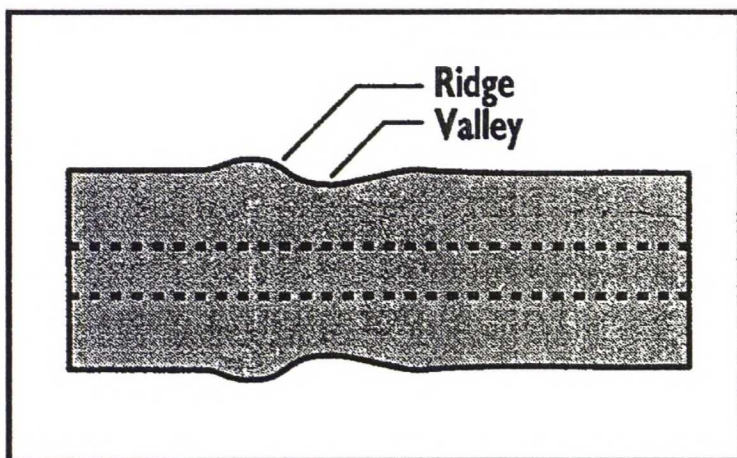
Rullavana tai vana voi olla neliöpaino-, paksuus-, kosteus-, orientaatio-, kiilto-, karheus-, päällystemäärä-, kireys- tms. vana tai näiden yhdistelmä /23/. Vanat voivat vaihdella leveydeltään muutamasta millimetristä useisiin senttimetreihin ja pituudeltaan ne voivat olla muutamia metrejä tai yhtäjaksoisia, usean kilometrin mittaisia konesuunnan häiriöitä. Lisäksi ne voivat olla koneen poikkisuunnassa stabiileja tai ne voivat siirtyä lyhyellä etäisyydellä paikasta toiseen. Konerullassa voi olla yhtäaikaan useampi vana ja ne voivat olla toisiinsa nähden joko säännöllisesti tai epäsäännöllisesti sijoittuneena koneen poikkisuunnassa. Useimmiten kyseessä on kuitenkin stabiili, yhtäjaksoinen häiriö, joka on ennen kaikkea ulkonäöllinen vika, mutta riittävän pahana se häiritsee paperin rullautuvuutta ja heikentää paperin laatua.

Vanaisuuden määritelmä vaihtelee eri yhteyksissä, mutta useimmissa tapauksissa tutkimuksen mielekkyyden ja mittaustarkkuuden takia on keskitytty stabiileihin vanoihin, jotka ovat leveydeltään 1-30 cm /24, 25, 26/. Monesti paperin paksuusvaihtelut ovat satunnaisia ja ne neutralisoituvat monesti viimeistään leikkurilla. Vain stabiilit paksummat tai ohuemmat kohdat radassa johtavat huonoon rullan rakenteeseen.

¹ Myös englanninkielisten termien määrä on monenkirjava. Sanaa patti vastaa englannin kielessä termi ridge. Muita synonyymejä ovat mm. MD lines, ribbing, conduroy, hard rings, bars, buckle, chain marks, rope marks ja crow's feet. Saksan kielessä käytetään termejä Streifen ja Bucklige.

3.1.2 Vanojen muodot ja dimensiot

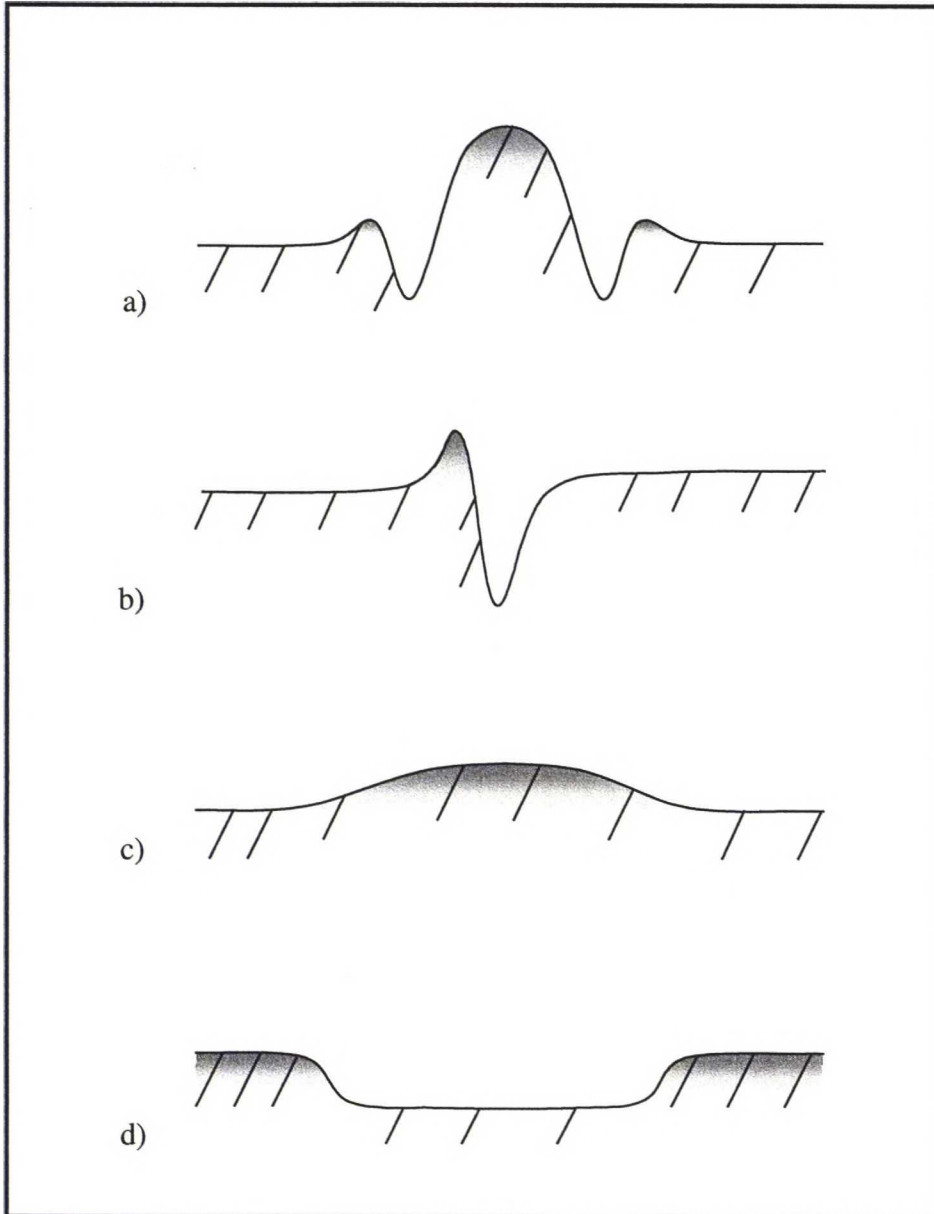
Paksuusvanan muoto vaihtelee suuresti vanan koon ja sen syntylähteen mukaan. Mitään standardimenetelmää vanan muodon toteutukseksi ei ole käytössä, mutta muodon ja koon perusteella voidaan päästä helpommin käsiksi itse virhelähteeseen. Kuva 10 on periaatekuva rullassa esiintyvistä paikallisista halkaisijamuutoksista. Yleisin syy halkaisijamuutokseen on paperin paksuusprofiilissa oleva paksumpi tai ohuempi kohta, mutta samalla rullassa voi esiintyä eroja myös pituusprofiilissa. Esimerkiksi kuvan 10 tapauksessa on mahdollista, että patti on syntynyt pelkästään paperissa olevasta paksummasta kohdasta tai paperi on paksumpaa, mutta samalla se on myös venähtänyt ja näyttää aukirullattaessa pussimaiselta /18/. Yksi käytännönläheinen esimerkki tästä on wc-paperin jalostusprosessi, jossa yksittäiset paperikerrokset kiinnitetään toisiinsa mekaanisesti ns. reunapuristusmenetelmällä. Siinä rataa puristetaan tietyistä kohdista metallisilla pyörillä erityistä kumipintaista vastatelausta vasten. Tällöin nipissä tapahtuvan puristuksen johdosta se kohta radassa venyy enemmän kuin muut ja lopputuotteessa tämä näkyy halkaisijan kasvuna (lievät kohoumat wc-paperirullan molemmissa reunoissa) ilman alkuperäisessä paksuus- ja neliömassaprofiilissa olevaa vaihtelua. Ilmiö on mahdollinen myös painopapereilla etenkin silloin, kun radan levitys ennen kiinnirullainta ei ole riittävä.



Kuva 10. Rullan halkaisijavaihtelut voivat johtua paikallisesta paksuus- ja pituusprofiilivaihtelusta /18/.

Kuvassa 11 on esitetty muutama vanatyyppejä. Nämä ovat konerullan visuaalisen tarkastelun pohjalta tehtyjä havaintoja, jotka näkyvät yleensä tarkemmassa poikkiratanäytteiden analysoinnissa. On myös mahdollista, että vanan muoto ei säily samanlaisena läpi konerullan johtuen mm. pinnan relaksoitumisesta, rullan sisäisistä jännityksistä, mahdollisesta konerullan oskilloinnista ja vanan epästabiilisuudesta. Tämä ilmeni myös työn alussa tehtyjen esikokeiden aikana sekä LWC- että SC-paperilla. Kuvassa 11 esitetty a-kohdan vana ei näkynyt valmiin konerullan pinnassa, mutta pintamuuton ajon jälkeen ilmiö tuli yhä selvemmin esille ollen voimakkain lähellä pohjaa, missä rullan sisäinen jännitys oli suurempi kuin pinnassa. Vanojen välimatka koneen poikkisuunnassa näytti olevan melko säännöllinen, mutta halkaisijaerot eivät olleet kuin 1-3 millimetrin luokkaa.

Kohdassa 11b esitetty paikallinen paksuusprofiili on erittäin hankala korjata ja tällainen kohta aiheuttaa erittäin helposti rullaan rullaryppyjä. Pahin mahdollinen profiili on sellainen, jossa paksua kohtaa seuraa välittömästi paikallinen minimikohta ja tämän jälkeen on tasaista /5/. Näitä kohtia on hyvin vaikea paikantaa varsinkin on-line -profiilimittauksin, koska ne sijaitsevat liian lähellä toisiaan. Jos rullauksessa on taipumus muodostua rullaryppyjä, ehkä herkin ja tehokkain menetelmä, jolla voidaan ennustaa niiden ilmeneminen, on tarkastella rullan kovuuden muutosnopeutta tällä



Kuva 11. Esimerkkejä konerullassa esiintyvistä paksuusvanoista. a) Kapea, yleensä vain muutaman senttimetrin levyinen vana, joka syntyy huulisuihkussa esiintyvien pienimittakaavaisten virtaushäiriöiden tuloksena. b) Dimensioiltaan kuten kohdan a vana. Voi syntyä myös määrässä päässä olevista epäpuhtauksista, jotka häiritsevät virtausta. c) Reunoilta hitaasti kohoava vana, joka voi olla jopa muutaman kymmenen senttimetrin levyinen. Syntyy mm. kuluneiden kalanterin telojen seurauksena. d) Negatiivinen patti, joka esiintyy yleisesti päällystämättömällä kalanteroiduilla papereilla. Ne ovat yleensä muutaman senttimetrin levyisiä ja syynä on usein paikallisesti korkeampi kosteus tai alhaisempi neliömassa.

alueella. Kohdan 11d vana on tyypillinen kiillotuskalanterin oskilloinnin tuloksena näkyvä poikkeama rullan pinnassa. Tässä tapauksessa paperissa oleva profiiliheitto on todellisuudessa kapeampi ja amplitudiltaan suurempi, mutta sen vaikutus tasoittuu oskilloinnin seurauksena. Pahimmassa tapauksessa negatiivinen patti olisi niin syvä, että ajettavuus ei onnistuisi hallitusti.

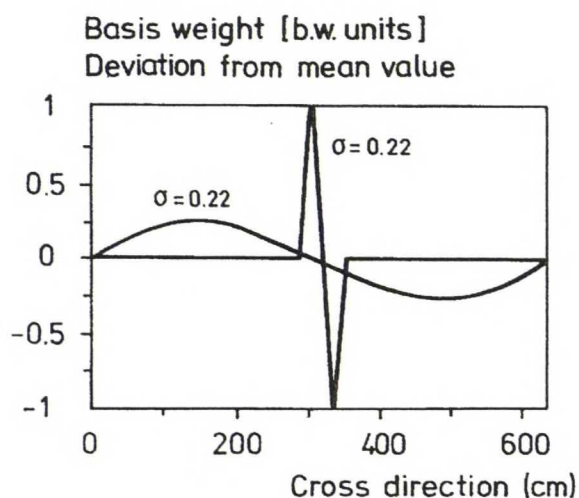
3.1.3 Vanojen kvantitatiivinen analysointi

Vanojen analysoinnista on olemassa vähän julkaistua tietoa. Yleisessä käytössä olevaa kvantitatiivista vanojen analysointimenetelmää ei ole olemassa, vaikka erilaisia kehitelmiä on kokeiltu. Yksittäisten tunnuslukujen käytöstä vanojen tulkintaan on luovuttu osittain siksi, että ne eivät välttämättä anna parasta mahdollista kuvaa vanojen olemassaolosta. Toinen syy tunnuslukujen puuttumiseen on se, että nykyään paperinäytteiden analysointi onnistuu melko tarkasti ja nopeasti käytössä olevilla paperianalysointilaitteilla. Näillä on mahdollista tarkastella kone- ja poikkisuunnan profiileja mm. varianssikomponenttianalyysin ja spektrien avulla.

Vanoja kuvaavat tunnusluvut ovat painottuneet kuvaamaan paperin neliömassavanaisuutta, mutta näitä tunnuslukuja voidaan käyttää myös muiden profiilien, kuten paksuus- ja kiiltoprofiilin, kuvaamiseen. Neliömassaan perustuvia tunnuslukuja ovat mm. vanan leveys, amplitudi, intensiteetti, pituus ja stabiilisuus, reunojen jyrkkyys, lukumäärä, keskinäinen välimatka (jakautuminen), vinous ja osuus kaikesta neliömassavaihtelusta /25/. Varsinkin neliömassavanojen tunnuslukuihin vaikuttavat mitta-aukon koko ja muoto sekä mittauspisteiden välimatka.

Vanojen analysointi soveltuu esimerkiksi laaduntarkkailuun ja ajo-olosuhteiden vertailuun /25/. Analyysistä saatavia paperin laatua kuvaavia mittalukuja on jopa joskus käytetty paperikoneen takuuehtojen yhteydessä. Esimerkiksi pyrittäessä pienentämään paperin neliömassavaihtelua, jolla on merkittävä positiivinen korrelaatio paperin paksuusvaihtelun kanssa, on syytä selvittää vaihtelun syy ja vanojen osuus kokonaisvaihtelusta. Tätä havainnollistaa kuva 12. Keskihajontaa käytetään yleisesti kuvaamaan säätöjärjestelmän toimintaa laadun hallinnassa, mutta joissain tapauksissa

tämä saattaa antaa puutteellisen kuvan profiilin tilasta. Tämä koskee etenkin rullaustapahtuman kannalta haitallisia vanoja, joita muodostuu jyrkkien paikallisten profiilivaihteluiden seurauksena. Esimerkiksi kuvan 12 kaltainen piikikkyys profiilissa on ajettavuuden ja rullautuvuuden kannalta huomattavasti haitallisempi kuin loivat vaihtelut profiilissa.



Kuva 12. Esimerkki keskihajonnan puutteesta kuvata prosessissa esiintyvää todellista vaihtelua /27/.

Kuvan 12 mukaisen tilanteen perusteella voitaisiin vanaisuuden kuvaamiseen käyttää keskihajonnan rinnalla esimerkiksi profiilin jyrkkyystekijää, joka kertoo enemmän vaihtelun luonteesta. Neliömassaprofiilin *jyrkkyystekijä* S määritellään seuraavasti /25/:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (m_{i+1} - m_i)^2 \quad , \quad (1)$$

missä

S on jyrkkyystekijä (g/m^2)²

m_i on neliömassa kohdassa i (g/m^2) ja

n on kaikkien mitattujen neliömassa-arvojen määrä.

Kaava (1) kuvaa siis profiilin vierekkäisten mittauspisteiden erotusten suuruutta ja se painottaa suuria neliömassaeroja neliöimisen vuoksi. Painotuksia voidaan muuttaa modifioimalla jyrkkyystekijää. Kaavaa (1) voidaan käyttää myös paksuusvanaisuuden kuvaamiseen korvaamalla neliömassa m_i *paksuudella* d_i . Viitteessä /25/ on laajempi selvitys kehitetystä analysointimenetelmästä, jolla voidaan paikantaa profiileista alle 30 cm leveitä vanoja ja laskea niille eri tunnuslukuja. Analyysimenetelmässä profiileille on suoritettu yli- ja alipäästösuodatus.

Jos analyysin tarkoituksena on paperin laadun seuraaminen ja/tai tuotantoprosessin toimintarajojen hakeminen, on vanan sijainnin lisäksi tärkeää tietää sen intensiteetti ja muoto. Viitteessä /25/ on esitetty vanan leveyttä ja korkeutta kuvaava tunnusluku *vanan varianssi* ϕ_k^2 , joka määritellään seuraavasti:

$$\phi_k^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=n_1}^{n_2} (m_i - \bar{m})^2 \quad , \quad (2)$$

missä

m_i on neliömassa kohdassa i (g/m^2)

\bar{m} on profiilin neliömassan keskiarvo (g/m^2)

n_1 on vanan k etureunan paikka

n_2 on vanan k takareunan paikka ja

n on profiilin havaintopisteiden lukumäärä.

Vanin varianssin laskennassa reunat on määritetty suodatetusta profiilista tietyn rajakorkeuden perusteella ja laskentaan on otettu mukaan ne neliömassa-arvot, jotka poikkeavat profiilin keskiarvosta enemmän kuin vanin rajakorkeus. Toisin sanoen kaava (2) kuvaa profiilin todellisen kuvaajan ja profiilin keskiarvon väliin jäävän alueen neliöllistä pinta-alaa vanin kohdalla. Rajakorkeuden valinta on laskennan kannalta olennainen tekijä, mutta sen määrittämiselle ei ole esitetty viitteessä /25/ selviä perusteita. Käytännössä se on määritetty profiilin keskihajonnan avulla. Tämä vaatii profiilien pidemmän aikavälin seuranta paperikoneella, jotta voidaan luotettavasti todeta, milloin profiilipoikkeama ilmenee vanana ja milloin ei.

3.2 Rullavanan syntymekanismi

Rullavanan syntyyn on olemassa monia syitä, jotka vaihtelevat mm. konelinjan ja eri paperilajien välillä. Poikkisuunnan profiilivaihtelut johtavat paksuusvaihteluihin, jotka voivat syntyä mm. seuraavista syistä /20, 23, 28, 29, 30/:

- epätasainen virtausprofiili perälaatikolla
- kulunut tai tukkeutunut märkäviira
- märkäviiran kudontatekniikasta johtuvat kireysvaihtelut viirassa
- märkäviiran kuroutuminen vedenpoistoelementtien aiheuttaman rasituksen johdosta
- tukkeutunut puristinhuopa tai imutela
- vioittunut tai tukkeutunut kuivatusviira
- likaantunut kuivatussyylinterin pinta
- alipaineistettujen Vac-telojen urajako (ohuilla lajeilla)
- päällystemäärävaihtelut
- epätasaisesti kulunut vastatela erityisesti teräpäällystyksessä
- kalanterin telojen likaantuminen tai kuluminen
- puutteellinen profiilin säätöjärjestelmän hallinta

Nämä viat yhdistettynä suureen rullauskireyteen lisäävät pattien esiintymistodennäköisyyttä /20/. Tarkasteltaessa patin syntyä eri lajeilla, on syytä tehdä jako päällystettyjen ja päällystämättömien lajien kesken. Esimerkiksi kosteusprofiilissa esiintyvät vaihtelut johtavat SC-paperilla päinvastaiseen lopputulokseen kuin LWC-paperilla osittain päällystekerroksen erilaisen kokoonpuristumisen vuoksi /31/. SC-paperilla kostea kohta on kokoonpuristuvampi ja plastisoituu helpommin, jolloin siihen kohtaan syntyy pehmeä kohta konerullassa. LWC-paperilla puolestaan huonosti kuivuneen päällysteen on todettu muodostavan kovan patin konerullaan. Ilmiötä edesauttaa huono vesikierto kiillotuskalanterin kokilliteloissa, jolloin erityisesti paperitelan pinta jäähtyy paperin kostean kohdan vaikutuksesta. Myös pohjapaperin kostealla kohdalla on vaikutusta päällystekerroksen käyttäytymiseen. Vaikka syitä vanojen syntyyn on useita, niistä merkittävimpiä tekijöitä ovat perälaatikon toiminta ja

kiillotuskalanterin telojen kunto. Tässä kirjallisuusosassa jätetään päällystysprosessi yksityiskohtaisen tarkastelun ulkopuolelle.

3.2.1 Perälaatikon vaikutus paperin vanaisuuteen

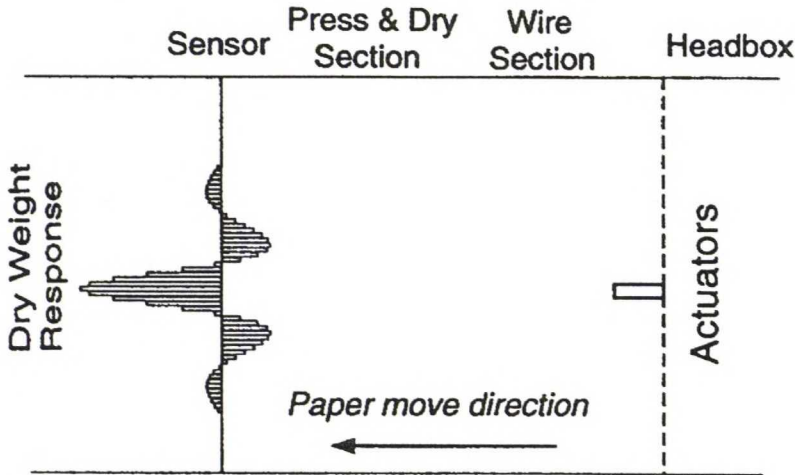
Paperin rakenne ja sen fysikaaliset ominaisuudet riippuvat käytetystä raaka-aineesta ja valmistusprosessista. Keskeisin rainan muodostukseen vaikuttava tekijä on perälaatikko, jonka toimivuus on koko paperikoneen tehokkuuden kannalta ratkaisevassa asemassa. Perälaatikolla tapahtuvalla neliömassan säädöllä on suora vaikutus moneen muuhun paperin ominaisuuteen ja siksi se on myös paljon tutkittu prosessivaihe. Perälaatikon toimivuuden varmistamiseksi ovat virtauskinetiikan tunteminen ja prosessin tarkka mallintaminen tarpeen.

Leveitä ja stabiileja vanoja voidaan hallita on-line –säädöin, mutta kapeiden ja nopeasti muuttuvien vaihteluiden eliminointi on tällä hetkellä käytännössä lähes mahdotonta. Ainoa keino, jolla voidaan vaikuttaa kapeiden vanojen syntyyn, on modifioida valmistusprosessia, sillä häiriöt on syytä poistaa niiden syntykohdassa. Häiriöt perälaatikossa johtavat usein kontrolloimattomiin kapeisiin vanoihin, joiden alkuperää voi olla vaikea selvittää. Lisäksi eri toimielinten yhdysvaikutukset ovat hankalia määrittää. Vanaisuutta esiintyy kaikentyypisissä perälaatikoissa, mutta tietyillä malleilla on omat erityispiirteensä. Lisäksi on todettu, että nopeuden ja perän sakeuden nostolla on kapeaa vanaa lisäävä vaikutus /24, 25, 32/.

Nykypäivänä valtaosa perälaatikoista on varustettu joko kärkilistalla tai laimennussäädöllä. Uusimmilla paperikoneilla, joissa on laimennussäätö, on poikkisuunnan säätötarkkuus huomattavasti kapeampi kuin kärkilistasäätöisellä laatikolla, jossa säätöelinten lukumäärää rajoittaa itse huulen rakenne, joka ei kestä liian jyrkkiä taivutuksia ilman pysyviä muodonmuutoksia. Kärkilistasäätöisissä perälaatikoissa on mahdollista säätää vyöhykettä, jonka leveys on suurempi kuin kaksi kertaa huulikarajako /23/. Kuvan perälaatikon huulen rakenteen herkkyydestä antaa eräs esimerkkitapaus, jossa vanaisuuden yhdeksi syyksi havaittiin alahuulen valmistuksesta johtunut amplitudiltaan 50 µm:n poimuilu /33/. Myös alahuulen otsapinnan yläsärmän,

joka on käytännössä viimeinen rajapinta suihkun irrotessa huulelta, tulee olla poikkisuunnassa yhtenäinen, sillä lähes olemattomat pyöristymät tai kolhut huulen poikkisuunnassa aiheuttavat epätasaisen virtaaman.

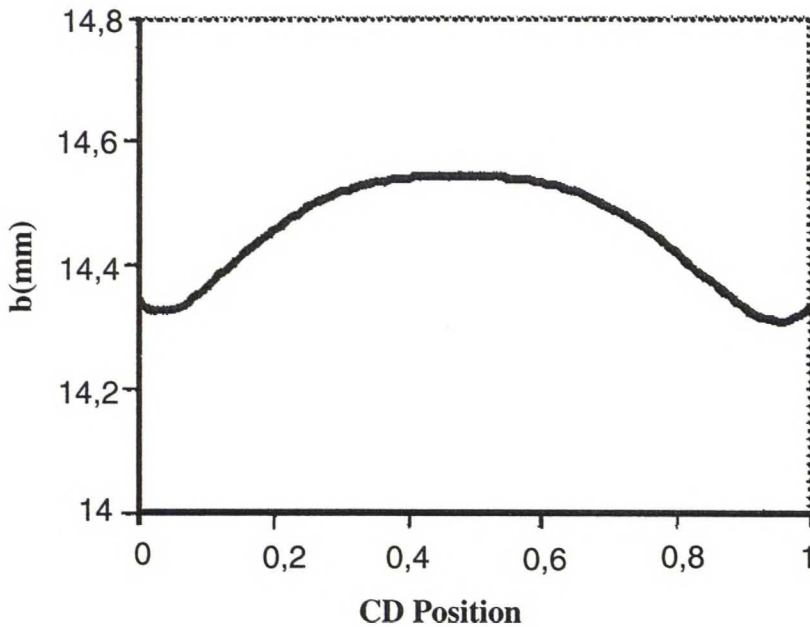
Yleinen ongelma huulikaroilla tehtävän säädön kanssa on vasteen muoto, joka ei useinkaan vastaa ennalta odotettua tulosta. Yhden huulikaran säätö vaikuttaa myös sen vierekkäisiin virtauksiin ja todellinen vaste on usean vasteen summa. Ongelmia tuottavat erityisesti vasteen riippuvuus koneen nopeudesta, tuotettavan paperin neliömassasta, viiran vedenpoistoprofiilista ja sen epälineaarisuus huulikaran asentoon nähden /27, 34, 35/. Viitteessä 27 on myös ehdotettu käytännön esimerkkiin perustuen, että huulen säädöllä tulisi optimoida sekä kosteus että neliömassaprofiili samanaikaisesti. Kuvassa 12 on havainnollistettu yhden säätökaran vaikutus kuivaneliömassaprofiiliin.



Kuva 12. Yhden toimielimen impulssin vaste kuivapainoprofiilissa /35/.

Huulisuihkun kone- ja poikkisuuntaisilla nopeuskomponenteilla on todettu olevan käytännössä tärkeä merkitys tuotetun paperin laatuun /34, 36/. Vaikka poikittaiset virtaukset ovat pieniä koneen nopeuteen verrattuna, viiran ja huulisuihkun väliseen pieneen nopeuseroon nähden ne ovat merkittäviä. Poikkisuuntaisiin virtauksiin vaikuttaa huulen muoto, jonka optimointi on helpottunut tietokoneavusteisten virtausmallinnusten (CFD = Computational Fluid Dynamics) myötä. Kuvassa 13 on mallinnusten avulla optimoitu huulen muoto, jonka pitäisi eliminoida poikkisuuntaisen neliömassaprofiilin säädöstä aiheutunut häiriö orientaatiokulmaan synnyttämällä korjaavia poikkisuuntaisia nopeuskomponentteja huulisuihkuun /32, 34/.

Kärkilistan vaikutuksesta vanaisuuteen on olemassa hiukan ristiriitaisia mielipiteitä, mutta Schlupp ja Karila /32/ ovat selittäneet suurimittakaavaisten vanojen synnyn alahuulen ulottuman aiheuttamalla epätasaisella huulisuihkun pystysuuntaisella nopeusjakaumalla sekä kärkilistan aiheuttamalla pyörteilyllä. Toisaalta taas kärkilistan on todettu vähentävän vanaisuutta, kun perälaatikkoa ajetaan suunnittelunopeutensa yläpuolella. Myös huulisuihkun iskugeometrian on todettu voimistavan vanaisuutta varsinkin tasoviirakoneilla /33/.



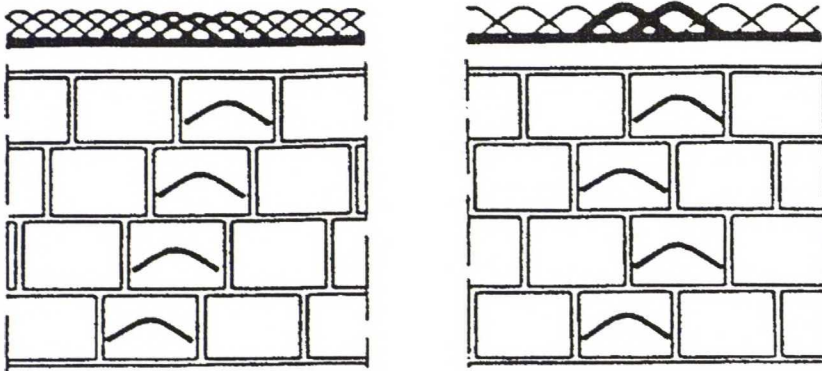
Kuva 13. Mallinnusten perusteella optimaalinen huulen muoto neliömassaprofiilin ja orientaation kannalta /34/.

Laimennussäätö perustuu laimennusveden lisäämiseen määrättyyn poikkisuunnan kohtaan, jolloin virtauksen sakeus ja neliömassa tässä kohdassa laskevat. Laimennukseen käytetään yleisesti nollavettä, jossa on enemmän tai vähemmän hienoja täyteainetta. Tämä lisää laimennussäädön hallinnan vaativuutta varsinkin retention kannalta. Kirjallisuudessa on mainittu muutamia laimennussäädön yhteydessä esiintyviä ongelmia, jotka saattavat aiheuttaa vanaa. Laimennusveden sekoittuminen saattaa olla puutteellista /37/, yhden laimennusventtiilin vaste saattaa olla liian leveä säätöalgoritmille /38/ ja saostumat laimennusventtiileissä ovat mahdollisia /39/.

Paperikoneiden nopeuden nousun myötä virtaamat perälaatikossa ovat kasvaneet ja sen myötä virtausten hallinnan vaatimukset ovat nousseet. Perälaatikon virtauksiin vaikuttavat suuresti eri osien muotoilu ja virtaama-alue, jolle se on mitoitettu. Perälaatikon rakenteesta aiheutuu nopeuden ja paineen satunnaisvaihtelua, jota kutsutaan turbulenssiksi. Rainanmuodostuksessa sen on oltava optimaalinen, sillä liian suuri turbulenssi aiheuttaa formaation huononemisen ja liian vaimea turbulenssi

kasvattaa flokkikokoa. Rainanmuodostuksen kannalta olisi parasta, että virtaus olisi tasaantunut, sillä nopeassa vedenpoistossa ja kuivatuksessa paikalliset erot saattavat korostua /23, 36/. Tämä tarkoittaa myös sitä, että turbulenssin optimointi vaatii uudemmilla paperikonekonstruktiolla enemmän tarkkuutta kuin tasoviirakoneella, jossa ulostulosuihkussa ilmenevät vanat ehtivät hivenen tasoittua viiralla. Mitä suuremmalla virtausnopeudella ajetaan, sitä pidemmälle vanat etenevät.

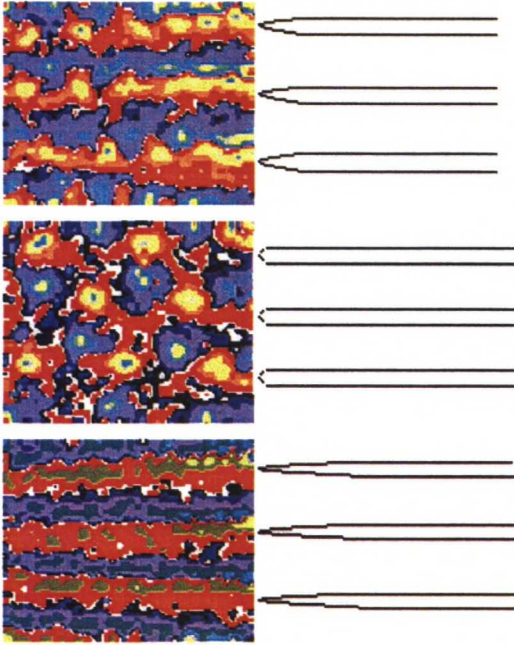
Turbulenssigenaattorin seinämäpinnat aiheuttavat paikallisia virtausnopeus- ja sakeusvaihteluita. Eri kanavista tulevien virtausten epästabiili yhteenliittyminen johtaa epätasaiseen huulisuihkuun, minkä vuoksi kanavien muodolla ja sijoittelulla on merkitystä. Kuvassa 14 on havainnollistettu turbulenssigenaattorin kanavien sijoittelun vaikutus profiileihin. Joissakin ratkaisuissa kanavat on sijoitettu päällekkäin, ja kanavien muotoilulla on pyritty eliminoimaan vanojen synty. Turbulenssigenaattorin kanavien sisääntuloreikien halkaisijavaihteluiden on myös todettu voimistavan vanaisuutta /33/.



Kuva 14. Turbulenssigenaattorin yksittäisten kanavien summautuminen kahdella eri esimerkkikonstruktiolla /40/.

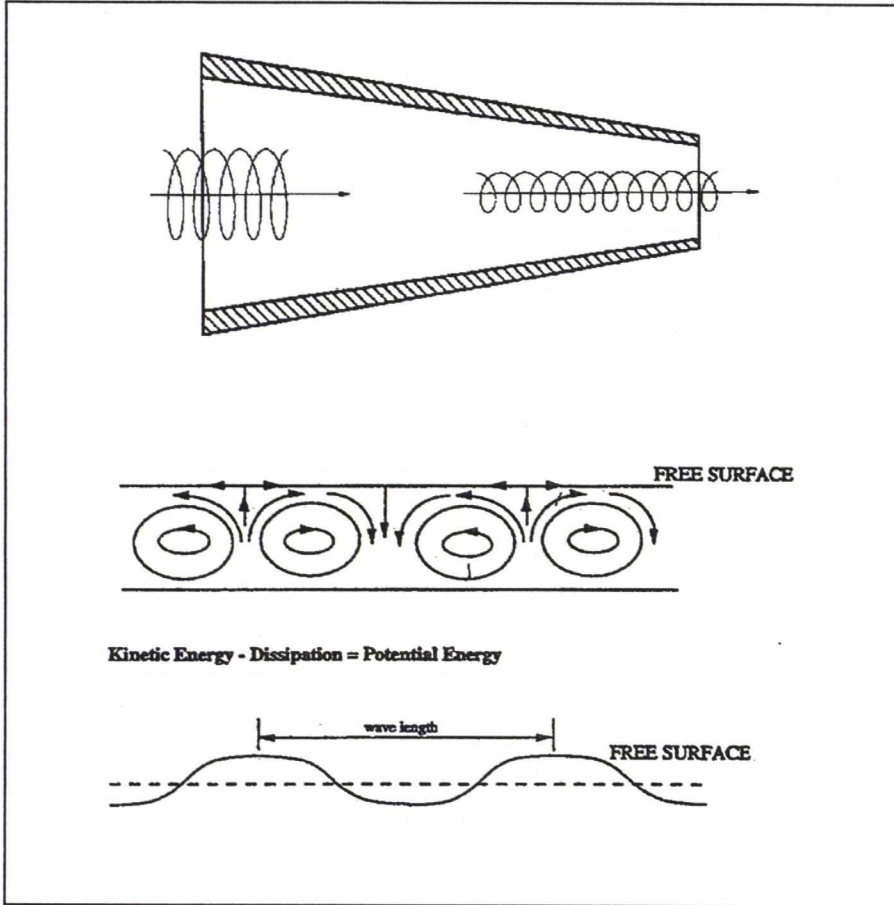
Turbulenssia on pyritty tuottamaan myös erityisillä hetularatkaisuilla, joiden päätarkoitus on ollut orientaatiovanojen eliminoiminen ja sitä kautta alhaisemman vetolujuussuhteen saavuttaminen lajeilla, joissa sitä tarvitaan /23, 42/. Hetuloiden jättöpään muotoilulla on pyritty muodostamaan pienimittakaavaisia pyönteitä, jotka

sekoittavat virtausrakennetta, mutta vaimenevat ennen rainanmuodostusta. Kuvassa 15 on esimerkkejä hetuloiden muotoilun vaikutuksesta massavirtaukseen.



Kuva 15. Eri hetularatkaisujen vaikutus turbulenssiin /41/.

Aidun /26, 43/ on pyrkinyt selittämään kapeiden vanojen synnyn sekundaarivirtausten avulla, jotka syntyvät turbulenssigenaattorissa. Näiden kapeiden vanojen aallonpituuden on todettu tyypillisesti olevan välillä 2 - 4 cm /26, 44/, mikä tarkoittaa sitä, että niiden havainnointi nykyisillä on-line -antureilla on lähes mahdotonta. Mallinnusten ja pilot-kokeiden perusteella hän on todennut näiden jättöpyörteiden syntyvän turbulenssigenaattorin putkista tulevien vierekkäisten suihkujen yhtymäkohdassa, niiden liikuessa kohti kapenevaa huuliaukkoa /26/. Nämä poikkipinnan tasossa ilmenevät pyörteet näkyvät vanoina huulisuihkun irrotessa huulelta ja niiden olemassa olo voidaan paikantaa mm. nopeaa digitaalikameraa ja kuvankäsittelytekniikkaa apuna käyttäen. Kuvassa 16 on esitetty sekundaarivirtausten aikaansaama rainan vapaan pinnan vaihtelu.



Kuva 16. Sekundaarivirtausten aikaansaama rainan vapaan pinnan vaihtelu /26, 41/.

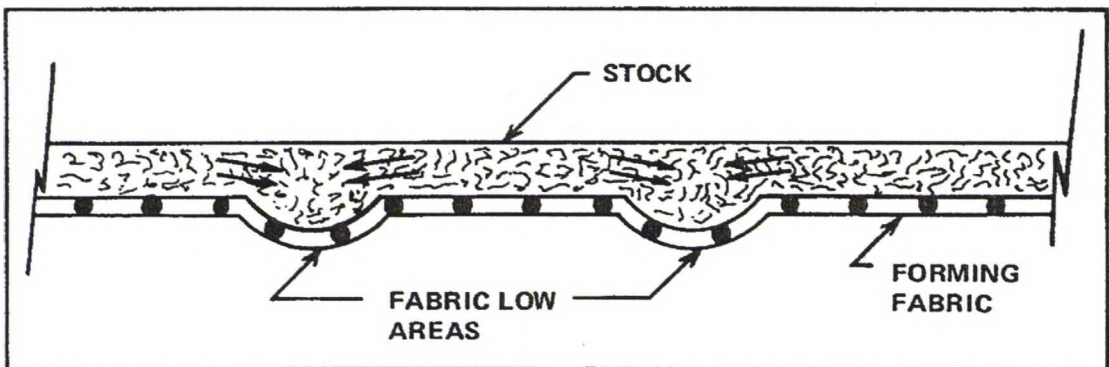
Kuvassa 16 esitetyt vastakkaiseen suuntaan pyörivät virtaukset siis joko nostavat tai laskevat vapaata pintaa aiheuttaen vanaa, jonka aallonpituus kaksi kertaa pyörteiden leveys. Poikkisuunnassa nämä vanat näkyvät nykyisillä analyysilaitteilla ainakin neliömassa- ja taiputusjäykkyysprofiilissa /26, 44/. Jos näitä vastakkaiseen suuntaan pyöriviä virtauksia voidaan kontrolloida tai ne voidaan poistaa kokonaan ennen huulta, vähenee vanaisuus huomattavasti ja perälaatikon toiminta paranee. Aidunin tutkimukset ovat antaneet lupaavia tuloksia ja tehtyjen havaintojen pohjalta on kehitetty mm. uudenlainen putkisto, jolla voidaan hallita sekundaarivirtauksia /26/.

3.2.2 Paperikoneen kudosten vaikutus paperin vanaisuuteen

Hyvin yleinen valmiissa paperissa esiintyvän vanan aiheuttaja on kulunut tai tukkeutunut kudos. Viiraosalla olevat epäpuhtaudet vedenpoistoelimissä ja rakenteissa,

jotka ovat kosketuksissa viiran kanssa, kuluttavat helposti viiraa jättäen niihin konesuunnassa yhtenäisen vanan, joka muuttaa viiran läpäisyominaisuuksia. Tukkeutuminen voi johtua myös viiran painepesurin suuttimien tukoksista tai huonosta suuntauksesta, tosin jälkimmäinen ongelma häviää useimmiten pesurin oskilloinnin myötä. Myös epäoptimaalinen kemikaaliannostelu (mm. retentioaine, viiran peittäysaine) voi johtaa paikoitellen viiran tukkeutumiseen. Nämä ilmiöt voivat esiintyä myös puristinhuovissa ja vähemmässä määrin kuivatusviirroissa, mutta lähes aina ne näkyvät valmiin paperin kosteus- ja neliömassaprofiilissa epätasaisuutena.

Myös märkäviiran rakenteella on huomattu olevan vaikutusta etenkin heikkojen neliömassavanojen syntyyn /28, 29, 45, 46/. Tiettyjen viirojen on huomattu aiheuttavan heikkoja neliömassavanoja ohuilla ja tiiviillä lajeilla säännöllisin välein koneen poikkisuunnassa johtuen kudontatekniikasta ja ns. merkkilangoista. Nämä vanat ovat tulleet esille mm. varianssikomponenttianalyseissä noin 20 cm:n aallonpituudella. Kudontatekniikasta aiheutuva viiran epätasainen kireysprofiili saattaa aiheuttaa kuvan 17 kaltaisen tilanteen /29, 39/.



Kuva 17. Märkäviirassa ilmenevien vanojen vaikutus rainanmuodostukseen /29/.

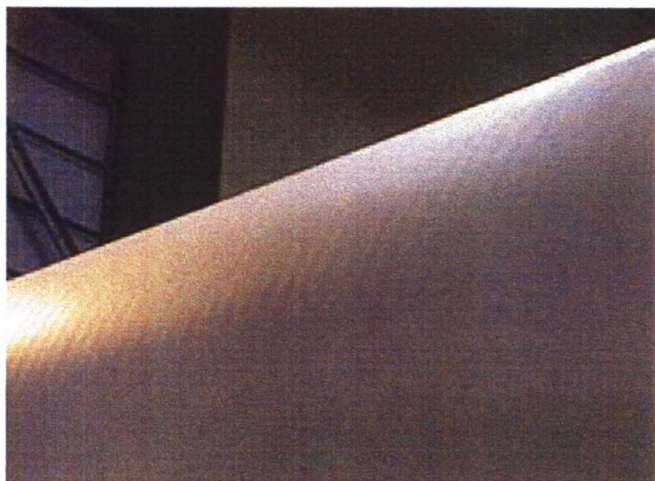
Viiran kireyteen vaikuttavat erityisesti käyttöjen ja pesureiden sijoittelu /28, 47/. Tämä ilmenee erityisesti kaksoisviirakoneilla, joissa riittämättömän jäykkyyden omaava alaviira joutuu väärin sijoiteltujen pesureiden vuoksi suuremman rasituksen kohteeksi kuin yläviira ja sen vuoksi alaviira kuroutuu poikkisuunnassa. Ilmiö selittyy Poisson-efektillä. Alaviiran vetotelan jälkeen aaltoileva viira ei ehdi levitä ennen kuin se

pakotetaan tasoon ja pesusuihkujen vaikutus ei ulotu läpi viiran samanlaisena. Tämä saattaa johtaa edelleen yläviiran lievään kasalle menoon.

3.2.3 Paperikoneen telojen ja sylintereiden vaikutus paperin vanaisuuteen

Puristinosalla on tärkeä merkitys rainan poikkisuuntaisten ominaisuuksien muodostumisessa. Puristinosalla olevien telojen kunto on tärkeä, sillä ne kuluttavat helposti puristinhuopia likaantuessaan. Yksi syy vanojen muodostumiseen on mm. uratelojen urien tukkeutuminen, mikä johtaa kosteusvanan syntyyn ja sitä kautta paperin paksuuden vaihteluun. Puristinosan tärinän ja puristuspaineen epätasaisen jakautumisen myötä saattaa rainaan syntyä märkäpuristuksessa selviä poikkisuunnan paksuusvaihteluita.

Kuivatussyylinterit voivat likaantua tai kulua, jolloin niiden lämmönsiirtokyky muuttuu. Myös epätasainen lauhteenpoisto johtaa epätasaiseen kuivatustulokseen. Varsinkin vanhemmilla koneilla kuivatussyylinterien pintalämpötilaprofiilit ovat usein epätasaisia. Yleinen näky kuivatussyylinterien pinnalla on kiinnipalanut panta, joka kuluttaa myös kuivatusviiraa. Erikoistapauksiin kuuluu paperikoneilla käyttöönotetut alipaineistetut Vac-telat, jotka on uritettu ja rei'itetty tietyin välein. Mikäli peräkkäisiä sylintereitä tai reikiä ei ole lomitettu oikein, saattaa ohuilla ja tiiviillä lajeilla näkyä lieviä kosteusvanoja (kuva 18). Sylinterissä olevan alipaineen vuoksi paperin tiettyihin kohtiin aiheutuu läpikuivatus, joka näkyy myös lämpötilaprofiilissa.



Kuva 18. Esimerkki Vac-telojen urajaan aiheuttamasta vanaisuudesta /23/.

Vastaavanlainen kuluminen ja likaantuminen on mahdollisia myös konekalanterin telojen kohdalla. Konekalanterin telojen halkaisijavaihtelut generoivat paperiin paksuusvaihtelua, joka näkyy konerullassa stabiilina paksuusvanana. Konekalanterin telojen halkaisijavaihtelut voivat syntyä valmistusvirheiden ja kulumisen lisäksi myös paperissa esiintyvien lämpötilavanojen seurauksena /48, 49/. Lämpötilavaihteluista aiheutuvat profiilivirheet korostuvat etenkin kovanippisillä kalantereilla, joissa halkaisijamuutokset voivat olla useita mikrometrejä /49/. Teloilla on tietyissä olosuhteissa taipumus hakeutua muotoon, jossa nippipaineprofiili on tasainen. Niskanen /49/ selittää ilmiötä sillä, että telojen ollessa paperia kuumempia lämmönsiirto telasta paperiin on voimakkaampaa alueilla, joilla nippipaine on suurempi. Sen tuloksena tela jäähtyy paikallisesti ja paineprofiili tasoittuu. Itsestään tasaava ilmiö estyy, jos lämmönsiirto on päinvastaista.

3.2.4 Kiillotuskalanterin telojen vaikutus paperin vanaisuuteen

Hyvin yleinen syy pattien muodostukseen kiillotetuilla papereilla on kuluneet telat. Nykyisin on käytössä useita erilaisia telojen pinnoitusmateriaaleja, jotka sietävät kulutusta erilailla, mutta toisaalta telojen kulutuskesto on osittain ristiriidassa niiden laatuvaikutuksen kanssa. Konekalanterin telojen käyttäytymismekanismi pätee myös suurelta osin kiillotuskalanterin koviin teloihin, mutta esimerkiksi kosteuden vaikutuksesta kuituteloihin löytyy erilaisia mielipiteitä. Erään näkemyksen mukaan

paperissa oleva kostea tai paksumpi kohta johtaa tässä kohdassa paineen nousuun nipissä ja sen seurauksena lämpötila kasvaa ja terästelan halkaisija laajenee /50/. Tällöin terästelan puristuma kuitutelaa vasten kasvaa ja kuitutelan halkaisija pienenee paikallisesti. Tämä puolestaan johtaa paperin paksuuden pienenemiseen ja venymän kasvuun, mikä näkyy myös konerullassa pehmeänä kohtana. Vastaavasti paperissa olevan kuivan tai ohuen kohdan on väitetty johtavan päinvastaiseen tulokseen. Tällöin terästelan painauma kuitutelaa vasten pienenee ja puristusaine laskee. Konerullassa tällainen kohta on viitteen /50/ mukaan kova. Vastaavasti paperissa olevan kostean kohdan on väitetty jäädyttävän kuitutelaa niin, että sen halkaisija pienenee kuten terästelalla käy eikä paperiin kohdistu tässä kohdassa yhtä suuri puristusaine kuin viereisiin kohtiin. Tätä väitettä tukee viitteessä /49/ oleva väittämä, jonka mukaan varsinkin alhaiseen kuiva-aineeseen kuivatuilla papereilla kosteat kohdat ovat kylmempiä ja lämpötilaprofiili kopioituu teloihin, mistä aiheutuu paksuusprofiilivaikeuksia. Järkevin selitys lienee kosteuspiikin kuitutelaa jäädyttävä vaikutus, mikä ei nykyisillä telamateriaaleilla ja lämmitysjärjestelmillä ole kovin voimakasta. Viitteen /50/ mukainen väittämä ei tunnu käytännön perusteella yleispätevältä, sillä monissa yhteyksissä on todettu, että lähtöprofiilissa oleva kostea kohta näkyy konerullassa pehmeänä kohtana päällystämättömillä lajeilla ja paksuudella on kovuuden suhteen voimakas positiivinen korrelaatio. Myös pehmeillä kalanterin teloilla esiintyvät kovuusvaihtelut saavat aikaan paperin paksuusvaihtelua.

Telojen kulumisen syynä ovat normaalisti epätasaisesti kuluneet, kuormitetut tai likaantuneet kaavarit sekä paperissa olevat suuremman neliömassan alueet. Paperissa oleva neliömassavirhe kuluttaa paperitelaan ajan myötä pysyvän jäljen, joka profiilien tullessa kuntoon aiheuttaa edelleen patin konerullaan. Tässä tapauksessa patit saadaan häviämään kuluneiden telojen vaihdolla.

3.2.5 Puutteellinen profiilin hallinta

Profiilinsäätöjärjestelmät ovat kehittyneet viime vuosikymmenen aikana huomattavasti ja sen vuoksi myös profiilivaihteluiden luonne on muuttunut. Ritala et al. /24/ ovat jakaneet profiilivirheet kahteen luokkaan:

- kapeat terävät vanat, jotka erottuvat selvästi hyvää tasaista pohjaa vasten
- puutteellisesta mittaustekniikasta ja eri profiilinsäätöjärjestelmien välisen kommunikaation puutteesta johtuvat koko koneen kannalta tarkasteltuna epäoptimaaliset säätöstrategiat.

Kapeiden vanojen oletetaan olevan häiriöitä, joita säätöjärjestelmän puutteellisen poikkisuuntaisen erottelukyvyn vuoksi ei havaita tai ne ovat vain tulleet paremmin esille parantuneen pohjanmuodostuksen seurauksena. Parantamalla poikkisuuntaisten mittauksen tarkkuutta ja kaventamalla säätöelimiä voidaan vanaisuutta ehkäistä tehokkaammin. Monilla tehtailla näkee myös usein säätölaitteita, joiden kohdistus ei ole profiilinsäätömielessä paras mahdollinen. Näitä ovat mm. höyrylaatikot ja jälkikostuttimet.

3.3 Rullavanan syntyä ehkäisy

Rullavanan syntyä käsiteltäessä mainittiin muutamia keinoja, joilla voidaan ehkäistä tai eliminoida syntyneet profiilivika. Tämän kappaleen tarkoituksena on koota oleellimmat keinot, jotka nykypäivänä ovat käytettävissä.

Tärkein vaikutus rullavanan syntyyn on prosessin mitoituksella ja sen modifioinnilla. Jotta vian syntylähde voidaan paikantaa, tarvitaan syy-yhteyksien systemaattista selvitystä ja hallintaa. Tällöin häiriöt voidaan poistaa niiden syntykohdassa. Kunnossapitoon tulee kiinnittää huomiota, sillä konelinjalla on useita kuluvia ja likaantuvia osia, jotka vaikuttavat paperin laatuun. Vanan muodostumisen kannalta merkittäviä ovat mm. kudokset, telat ja kaavarit.

Profiilimielessä vaihteluiden minimointi on hyvän laadun edellytys. Nykyisin on olemassa useita profiilointilaitteita, joilla voidaan kompensoida aikaisemmin prosessissa syntyneitä häiriöitä. Näitä ovat mm. höyrylaatikot, kostuttimet, vyöhykesäädettävät telat, infrakuivaimet tai erilaiset kalanteritelojen muodonmuutoksia aikaansaavat säätömenetelmät /48, 51, 52, 53/. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi puhaltamalla telan

pintaan kuumaa tai kylmää ilmaa halutun nippipaineen aikaansaamiseksi halkaisijaa paikallisesti muuttamalla. Profilointi voidaan tehdä myös induktiolla tai infroilla.

Rullaustapahtuman kannalta merkittävimpiä keinoja vanojen vaimentamiseksi ovat pehmeämpi rullaus ja oskillointi. Oskillointi on ollut yleisesti käytössä jo pitkään mm. off-line –kalantereilla, mutta tekniikka on otettu käyttöön myös uusimmissa toisen sukupolven rullaimissa. Tähän on päädytty osittain on-line –päällystys- ja kalanterointiteknologian yleistymisen myötä.

4 RULLAVANOJEN JA PAPERIN ERÄIDEN RAKENNE- JA OMINAISUUSPROFIILIN YHTEYKSISTÄ

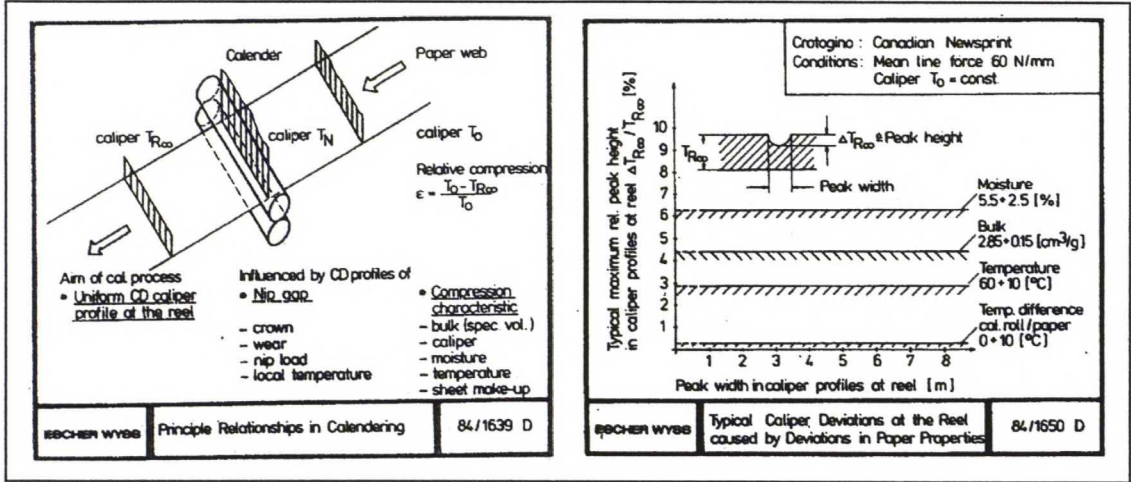
Paperirainan tärkeimmät profiilit rullan muodostuksessa ovat paksuus, kokoonpuristuvuus, venymä (pituus) ja elastisuus. Venymällä tarkoitetaan tässä jähmettynyttä ja plastista venymää. Kappaleessa 2.5 on käsitelty pintapuolisesti paperin ominaisuuksia, jotka vaikuttavat rullan rakenteeseen, mutta seuraavaksi käsitellään patinmuodostuksen kannalta tärkeimpiä profiileita hieman yksityiskohtaisemmin. Täytyy myös huomioda, että profiilivirheet ovat lajista riippuvaisia.

4.1 Paksuus

Valmiin paperin poikkiprofiileista paksuus on yksi laadun avaintekijöistä. Konepaperin paksuudella on merkittävä vaikutus päällystyksen ja jatkojalostuksen onnistumiseen. Paksuuteen vaikuttavat eniten neliömassa (kuivaneliömassa), kosteus, massakoostumus, kalanterin nippikuorma ja lämpötila /48, 53, 54/. Paperin eri muuttujien ristikkäisvaikutuksista johtuen on kalanteri usein viimeinen keino säätää paksuus halutunlaiseksi.

Weissshuhn ja Holik /48/ ovat jakaneet konerullan lopullisen paksuusprofiilin muodostumisen konekalanterin nippiprofiilin ja paperin kokoonpuristuvuusominaisuuksien kesken. Tätä voidaan soveltaa myös niillä koneilla, joilla ei ole

konekalanteria vaan kalanterointi tapahtuu off-line – kuten SC-linjoilla. Kuvassa 19 on havainnollistettu paksuusprofiilin muodostuminen.

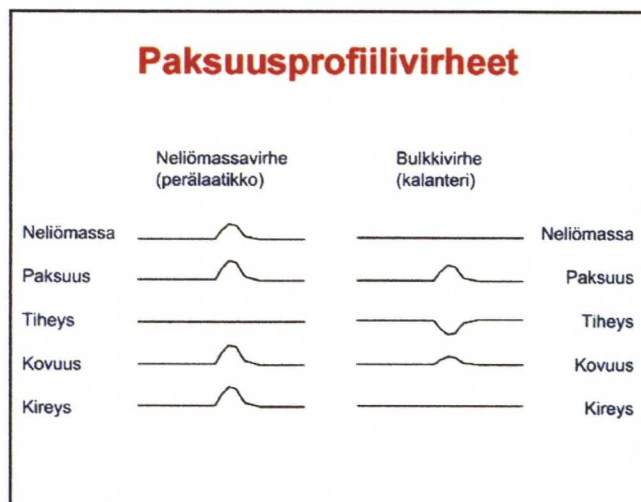


Kuva 19. Paperin lopullisen paksuusprofiilin muodostuminen sekä eri profiilien vaikutus paksuuteen /48/.

Kuvassa 19 esitetty paperin eri profiilien vaikutus paksuuteen on vain yksi esimerkki tietyllä lajilla tehdystä havainnosta. Monet käytännön kokemukset ja tutkimukset puoltavat yleistä käsitystä kuivaneliömassan ja kosteuden merkittävästä osuudesta lopullisen paksuusprofiilin muodostumisesta. Paperin paksuuden pieneneminen kosteassa kohdassa on seurausta paperin plastisoitumisesta z-suunnassa. Usein esimerkiksi korkeaa kuivaneliömassapiikin aiheuttamaa pattia pyritään kompensoimaan kosteuden nostolla. Telaprofiileista puolestaan lämpötila ja telojen kuluminen ovat selvimmän paperin paksuuteen vaikuttavia tekijöitä /31, 48, 54/.

Valmiissa paperissa esiintyvä profiiliepätasaisuus, patti tai kuoppa, voidaan kiteyttää kahteen tapaukseen. Syynä voi olla paikallinen *tiheyspoikkeama* tai *neliömassavirhe* (kuva 20). Kuten kuvasta ilmenee, olennaista on erottaa paksuusvirheen syntykohta. Jos esimerkiksi tiheys on poikkisuunnassa vakio, säilyy paksuusero teoriassa kalanteroinnin jälkeen. Tiheysvaihtelusta johtuva paksuusero saattaa myös syntyä esimerkiksi puristinosalla paperin epätasaisen kokoonpuristumisen vuoksi. Kuvan 20 yhteydessä on huomioitava, että kireyden ja kovuuden käyttäytyminen ei aina ole esitetyn kaltainen. Niiden profiileihin vaikuttavat merkittävästi mm. kosteus ja rullausvaihe. Esimerkiksi

neliömassapiikki näkyy paperikoneella kireyspiikkinä, mutta pituusleikkurilla ja jatkojalostuksessa sama kohta on yleensä muuttunut löysäksi relaxsaation ja venymisen vuoksi.



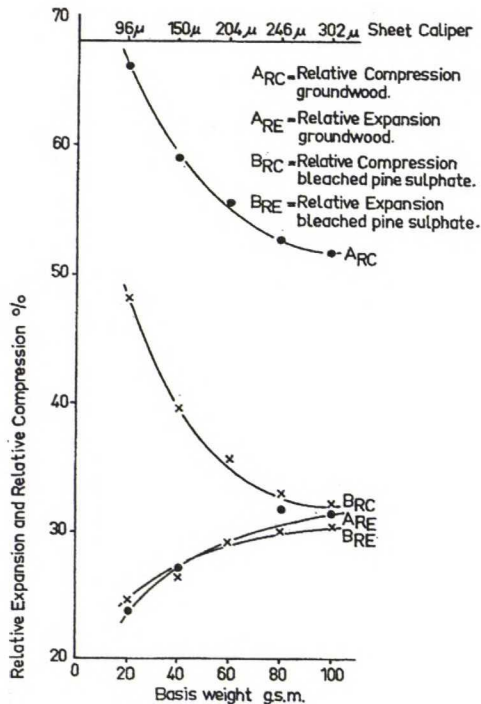
Kuva 20. Paksuusprofiilivirhe ja sen ilmeneminen muissa mitattavissa ominaisuuksissa /4/.

4.2 Kokoonpuristuvuus

Paperin kokoonpuristuvuudella tarkoitetaan lähinnä sen z-suuntaista muodonmuutosta paineen alla. Koska paperi on viskoelastinen materiaali, kokoonpuristuvuus on ajasta riippuvainen ominaisuus. Paperin kokoonpuristuvuus ilmoitetaan monissa yhteyksissä paksuuden muutoksen avulla, kuten kuvassa 19, mutta muodonmuutokselle on käytetty myös muita selittäviä tekijöitä riippuen mitä kokoonpuristuvuuden käsitettä halutaan ilmaista /55/. Kokoonpuristuvuutta tarkasteltaessa on olennaista erottaa paperin pinnan ja keskiosan erilainen kokoonpuristuvuus, joka voi olla hyvinkin erilainen eri lajeilla /56/.

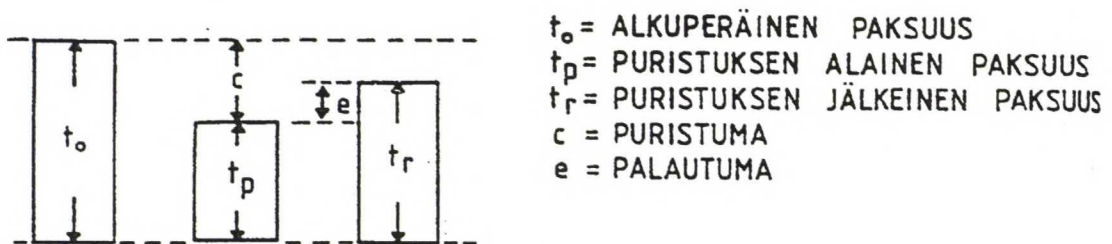
Paperin kokoonpuristuvuuteen vaikuttavia tekijöitä on useita. Niistä merkittävimpiä ovat paksuus, bulkki, kosteus, lämpötila ja paperin koostumus /48, 55/. Paksuuden ja bulkin vaihtelut ovat osittain rinnastettavissa neliömassan vaihteluun samoin kuin kosteuden yhteys lämpötilaan. Paksuuden tavoin kalanterointiolosuhteilla ja märkäpuristuksella on myös ratkaiseva vaikutus kokoonpuristuvuuteen /48, 57, 58, 59/.

Paperin paksuuden vaikutus kokoonpuristuvuuteen riippuu paksuusprofiilin syntytavasta (kts. kuva 20). Siksi paksuutta ja bulkkia on syytä käsitellä yhdessä kokoonpuristuvuuden yhteydessä. Mikäli paksuuserot johtuvat tiheysvaihteluista, huokoisempi kohta puristuu helpommin kasaan ja päin vastoin. Neliömassan kasvaessa suhteellinen kokoonpuristuvuus puolestaan pienenee /55, 59/. Kuten kuvasta 21 käy ilmi, ovat muutokset pienillä neliömassoilla merkittävämpiä kuin suuremmilla neliömassoilla. Tämä johtuu pinnan ja keskikerroksen erilaisen kokoonpuristumisen lisäksi myös formaation erilaisesta vaikutuksesta ohuemmissa lajeilla. Ohuilla lajeilla kontaktipinta-alan ja pintaelementtien sekä z-suunnassa olevien tiheysvaihteluiden merkitys korostuu. Neliömassan kasvun vaikutus kokoonpuristuvuuteen on rinnastettavissa myös paperipinon erilaiseen käyttäytymiseen puristuksessa verrattuna yksittäiseen arkkiin /56/. Tämän lisäksi paperin ja puristavan pinnan karheudella ja kitkalla on vaikutusta kokoonpuristuvuuteen, sillä paperi laajenee tasossa, kun sitä puristetaan paksuussuunnassa.



Kuva 21. Neliömassan vaikutus paperin kokoonpuristuvuuteen /59/.

Paperin kokoonpuristuvuutta määritettäessä paksuuden muutoksen avulla, puhutaan samassa yhteydessä usein palautumattomasta ja palautuvasta paksuudesta. Myös palautuva paksuus on ajasta riippuvainen suure. Puristusajan kasvaessa paperin paksuus pienenee z-suuntaisen virumisen myötä ja paineen vaikutuksen loputtua osa paksuudesta palautuu välittömästi ja osa vasta myöhemmin. Koska paperin suhteellinen palautuvuus suuremman neliömassan arvoilla on suurempi, korostaa se entisestään paksuuseroja kalanteroinnin jälkeen. Kuvassa 22 on selvitetty käsitteitä, jotka liittyvät kokoonpuristuvuuteen.



$$\text{SUHT. KOKOONPURISTUVUUS} = c / t_o \times 100\% = (t_o - t_p) / t_o \times 100\%$$

$$\text{SUHT. PALAUTUVUUS} = e / c \times 100\%$$

$$\text{SUHT. PALAUTUNUT PAKSUUS} = t_r / t_o \times 100\%$$

Kuva 22. Paperin kokoonpuristuvuuden ja paksuuden määrittäminen /60/.

Kosteudella on optimi kokoonpuristuvuuden ja paksuuden suhteen /57/. Liikuttaessa valmiin paperin loppukosteuden alueella, joka normaalisti on alle 10 % eri lajeilla, kosteudella on paperia plastisoiva vaikutus ja sen vuoksi paperi muokkautuu helpommin. Kohdistettaessa paine sille radan alueelle, jossa kosteus on suurempi, paperi puristuu helpommin kasaan ja se tiivistyy. On huomattava, että paperin z-suuntaisella kosteusjakaumalla on vaikutusta kokoonpuristuvuuteen. Jos kosteusvaikutus kohdistuu pelkästään paperin pintaan, puristuvat pintakerroksessa olevat kuidut helpommin kasaan rungon säilyessä huomattavasti yhtenäisempänä. Kosteus on yleisesti käytetty säätökeino kiillotuskalantereilla paksuuden ja kiillon optimointiin. Sillä on myös merkittävä vaikutus kireysprofiiliin /61/. Kosteusprofiilia pyritään tasaamaan paperikoneella esimerkiksi puristinosan höyrylaatikolla tai jälkikostuttimella, kuten SC-linjoilla yleisesti tehdään. Jackson ja Erikson /59/ ovat

myös todennet, että kuivattaessa paperia liikaa kuiduista tulee kovia ja kimmoisia, mikä johtaa pienempään kokoonpuristuvuuteen.

Lämpötilan noustessa paperin kokoonpuristuvuus kasvaa /57, 59/. Kartovaara /57/ on todennut lämpötilan vaikutuksen olevan merkittävä välillä 23°C – 105°C, mutta suuremmissa lämpötiloissa merkitys ei enää ole yhtä suuri. Suuremmassa lämpötilassa paperin plastisen muodonmuutoksen osuus kasvaa, mikä johtuu mm. käytetystä kuituraaka-aineesta ja sen lasittumislämpötilasta. Lasittumislämpötilan ylittyessä materiaali pehmenee ja muokkautuu helpommin.

Tutkimuksissa on todettu eri massoista valmistettujen papereiden kokoonpuristuvuuksissa olevan huomattavia eroja /55, 59, 62/. Samoin eri massafraktioiden epätasainen jakautuminen paperissa johtaa ainakin teoriassa eri kohtien erilaiseen kokoonpuristuvuuteen. Kemiallisesta massasta valmistetun paperin on todettu olevan vähemmän kokoonpuristuvampaa kuin mekaanisesta massasta valmistetun paperin. Samoin kierrätyskuidun lisäys tekee rainasta tiheämmän kuin neitseellistä kuitua käytettäessä. Hienoaineen vaikutuksesta kokoonpuristuvuuteen on olemassa selvää näyttöä /55, 59/, mutta täyteaineen rooli ei ole aivan yhtä selvä. Hienoaineen lisäys tiivistää paperia ja kokoonpuristuvuus pienenee. Täyteaineen on odotettu vaikuttavan kokoonpuristuvuuteen hienoaineen tavoin, mutta sen merkitys on selvästi vähäisempi. Täyteaineen vaikutuksesta kokoonpuristuvuuteen on olemassa hyvin niukasti tietoa ja nekin ovat osaltaan ristiriitaisia. Ilmeisesti eri täyteaineet vaikuttavat eri tavoin paperin kokoonpuristuvuuteen. Voidaan kuitenkin sanoa, että hienoaineen ja täyteaineen epätasainen jakautuminen koneen poikkisuunnassa johtaa paksuus- ja kokoonpuristumisvaihteluiden lisäksi myös muiden ominaisuuksien epätasaisuuteen.

4.2.1 Kokoonpuristuvuuden mallintaminen

Kokoonpuristuvuudelle on olemassa useita eri malleja, jotka voidaan jakaa lineaarisiin ja epälineaarisiin malleihin /63/. Empiirisiin kokein on todettu, että epälineaariset mallit soveltuvat parhaiten kuvaamaan paperin käyttäytymistä puristuksen alaisuudessa. Ehkä

yksikertaisimman mallin on kehittänyt Pfeiffer /15, 64/, joka on sovittanut kokeellisiin mittauksiin eksponentiaalisen mallin:

$$P = -K_1 + K_1 e^{K_2 \varepsilon} \quad , \quad (3)$$

missä

P on puristusaine (Pa),

ε on kokoonpuristuma,

K_1 on vakio (Pa) ja

K_2 on vakio.

Malliin on myöhemmin liitetty kolmas linearisoiva termi $K_3\varepsilon$, joka on käytännössä mallin skaalausta parantava tekijä, mutta riittävä korrelaatio ($R^2 > 0,99$) saadaan ilman sitäkin /65/. Paperin kimmokerroin z -suunnassa saadaan kaavan (3) derivaatasta derivoimalla paine P kokoonpuristuvuuden ε suhteen ja merkitsemällä $P + K_1 = K_1 e^{K_2 \varepsilon}$:

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = E = K_2 (P + K_1) \quad , \quad (4)$$

missä

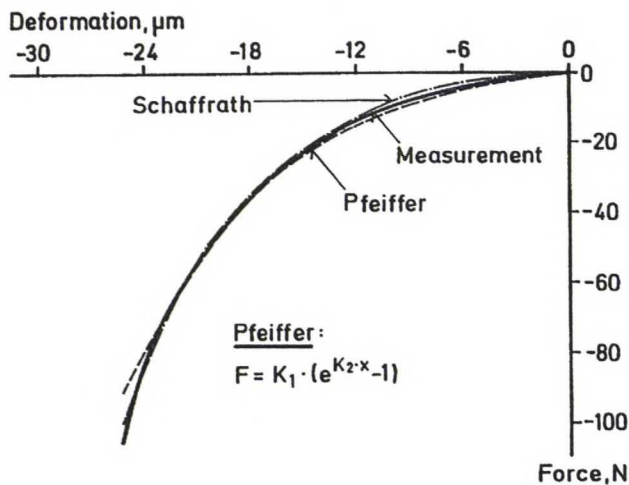
E on kimmokerroin (Pa).

Lisäksi kaavan (3) käyrän ja x -akselin väliin jäävän pinta-alan avulla saadaan laskettua se työ, joka tarvitaan tietyn tilavuusyksikön kokoonpuristamiseen.

Pfeiffer on kokeissaan mallintanut kokoonpuristuvuutta paperipinolla sekä nousevan että laskevan puristusaineen alaisuudessa tietyllä aikavälillä ja havainnut kokoonpuristuvuudella olevan hystereesitaipumuksen /64/. Se, kumpaa menetelmää tulisi käyttää rullauksen mallintamisen yhteydessä, riippuu mallinnettavasta rullaustapahtumasta. Pfeiffer suosittelee mallin parametrejä käytettävän kiinnirullauksen mallintamiseen, kun kokoonpuristuminen on mitattu nousevalla paineella ja vastaavasti laskevan paineen käyrä on soveltuvampi aukirullauksen mallintamiseen /15/. Tarkempi

kuvaus Pfeifferin kokeen järjestelyistä ja esimerkkejä kuvaajista löytyy mm. viitteistä /15/, /64/ ja /65/. Huomionarvoista on Pfeifferin käyttämä melko alhainen paineskaala (0-700 kPa), joka kattaa hyvin kuvan 6 mukaisen radiaalipainealueen, joka nippi-kuormaa muuttamalla saavutetaan.

Taulukossa 3 on esitetty muutamia muita kokoonpuristuvuutta kuvaavia malleja. Näistä selvästi raskain on Schaffrathin ja Götschingin mekaaninen malli, jossa paperin eri kerroksia kuvataan erillisillä jousilla. Mallista on kaksi versiota riippuen siitä, oletetaanko kimmokertoimen olevan vakio vai hyperbolinen. Malli pyrkii ottamaan huomioon myös paperin eri kerrosten rakenteen sekä pinnan karheuden ja kitkan merkityksen toisin kuin Pfeifferin ja Rodalin mallit, jotka olettavat paperin olevan rakenteeltaan lähes homogeeninen. Tarkempi kuvaus Schaffrathin ja Götschingin mallista löytyy viitteestä /56/. Taulukossa 3 on esitetty mallin perusyhtälö, jota sovelletaan lopullisen mallin muodostamisessa. Kuvassa 23 on vertailtu Pfeifferin ja Schaffrathin ja Götschingin mallien soveltuvuutta kokoonpuristuvuuden kuvaamiseen.



Kuva 23. Kokoonpuristuvuus filteripaperilla ja kahden eri mallin sovituksen vertaaminen /56/.

Löytyn malli /55/ perustuu lähes yksinomaan paperin verkstorakenteeseen ja huokoisuuteen. Se kertoo suoraan paperin rakenteesta toisin kuin monet muut mallit. Rodalin malli kuvaa puolestaan kalanteroinnissa tapahtuvaa paperin muodonmuutosta.

Taulukko 3. Eräitä kokoonpuristuvuutta kuvaavia malleja /63/. Schaffrathin ja Göttschingin mallin lopullinen muoto löytyy viitteestä /56/.

Malli		Parametri
Schaffrath & Göttsching	$F = \frac{E(x_i)A(x_i)}{h_i} x_i$	F on voima. E(x _i) on kimmokerroin. A(x _i) on kuormaa kantava pinta-ala. x _i on muodonmuutos.
Rodal	$P = \frac{x}{1 + ax^p} + bx^q$	a ja b ovat käyristymisparametrejä. b ja q ovat murskautumisparametrejä.
Löytty	$\varepsilon = \phi \left(1 - e^{-\frac{p}{E}} \right)$	ε on kokoonpuristuminen. φ on huokoisuus. p on puristusaine E on huokosten kimmokerroin.

4.3 Venymä ja elastisuus

Paperin kireysprofiili muodostuu paperin pituus- ja kimmokerroinprofiilista. Kun muodonmuutos on suoraan verrannollinen jännitykseen, noudattaa materiaali Hooken lakia, joka esitetään myös muodossa /66/

$$\sigma = E\varepsilon \quad , \quad (5)$$

missä

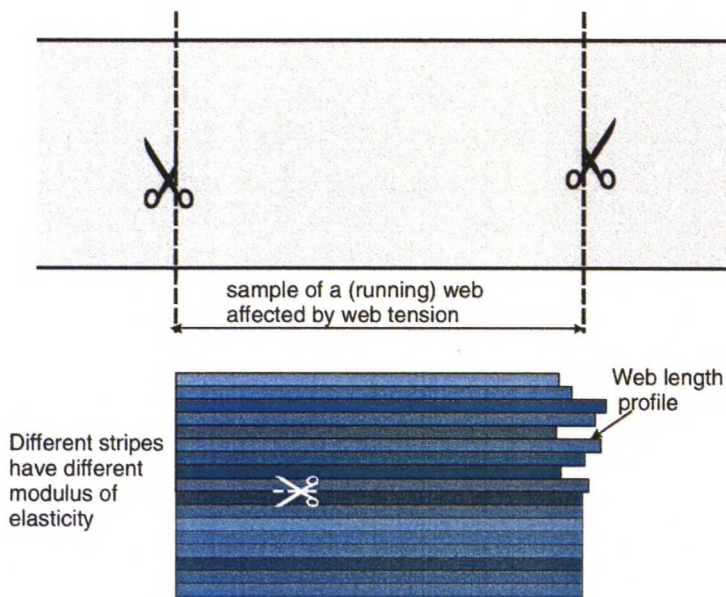
σ on jännitys (N/m²),

E on kimmokerroin (N/m²) ja

ε on venymä (%).

Käytännössä mekanismi on paljon monimutkaisempi ja paperi noudattaa tätä relaatiota vain pienillä jännityksillä. Lisäksi voima-venymä –käyrät kone- ja poikkisuunnassa ovat hyvin erilaiset. Kireyden muodostumiselle paperikoneella on olemassa myös tarkempia määritelmiä, jotka löytyvät viitteistä /66/ ja /67/. Paperin pituusprofiilin voidaan ajatella muodostuvan kuvan 24 mukaisesti. Leikataan paperiradasta koneensuuntainen näyte ja

jaetaan se kapeisiin liuskoihin. Leikkaustilanteessa paperi kulkee yhtenä rintamana ja siinä on tietty kireysprofiili. Kun koneensuuntainen näyte jaetaan ohuiksi suikaleiksi ja suikaleet vedetään suoraksi tasoon ja samaan jännitystilaan, havaitaan niiden kesken olevan pituuseroja. Suhteelliset erot ovat hyvin pieniä ja siksi niiden mittaaminen on melko vaikeaa. Mittaustulosten mukaan rainan kireysprofiilin vaihtelut korreloivat selvemmin paperin pituusvaihteluiden kanssa kuin elastisten ominaisuuksien (kimmokerroinprofiilin) kanssa /68/. Samassa yhteydessä havaittiin myös selvä kireyden ja kutistuman välinen negatiivinen korrelaatio paperikoneella.



Kuva 24. Paperin pituusprofiili /69/.

Kireysprofiilin muodostumiseen vaikuttavat mm. neliömassa, kosteus, lämpötila, paksuus, orientaatio sekä vedot puristin- ja kuivatusosalla. Tutkimuksissa on myös havaittu /61, 67/, että kalanterin nippikuorman säädöllä on merkittävä vaikutus kireysprofiiliin. Kireysprofiilin muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä on useita /67/, mutta tässä yhteydessä käsitellään profiilimeielessä tärkeimpiä vaikuttajia. On myös syytä todeta, että kutistuma ja venymä ovat tämän tarkastelun alla olevia paperin ominaisuuksia, kun taas kireys on prosessiin liitettävä ominaisuus.

Kuivaneliömassan nosto ja paksuuden kasvu lisäävät paperin vetojäykkyyttä ja sitä kautta myös radan kireyttä paperikoneella. Jos paperin kosteutta nostetaan kuivaneliömassan noston yhteydessä, kompensoi se neliömassan nostosta syntyvää kireyden kasvua. Myös paksuuden vaikutus saattaa kääntyä päinvastaiseksi, sillä paksumpi kohta rullautuu kireämmälle ja mitä kireämmälle paperi rullataan sitä suurempi on suhteellinen relaksaatio. Aukirullauksessa tämä koneella ollut kireä kohta saattaa tämän vuoksi näkyä leikkurilla löysänä pussina. Rainaan syntyy teoriassa pussimainen kohta, mikäli paikallisen halkaisijaeron suhde rullan kokonaishalkaisijaan on suurempi kuin paperin myötöraja tässä kohdassa. Pussimaista ilmettä voimistaa myös paikallinen kireä kohta, joka saa sen viereiset alueet näyttämään löysiltä.

Kostutuksessa paperin kimmokerroin pienenee ja plastisen venymän osuus kasvaa vedossa. Kosteusprofiililla on suuri merkitys muodostuvan konerullan laatuun, sillä samalla konesuuntaisella vetojännityksellä radan kosteampaan kohtaan syntyy suurempi plastinen venymä, joka vaikuttaa rullien myöhempään käsittelyyn. Märänpään vetojen on todettu kasvattavan kimmokerrointa sekä plastista venymää ja kuivanpään vedoilla venymä on enemmänkin elastista /70/. Jos rataa kastellaan myöhemmin uudestaan, saattavat jähmettyneet venymät pyrkiä kutistumaan kostutuksen ollessa tarpeeksi suurta.

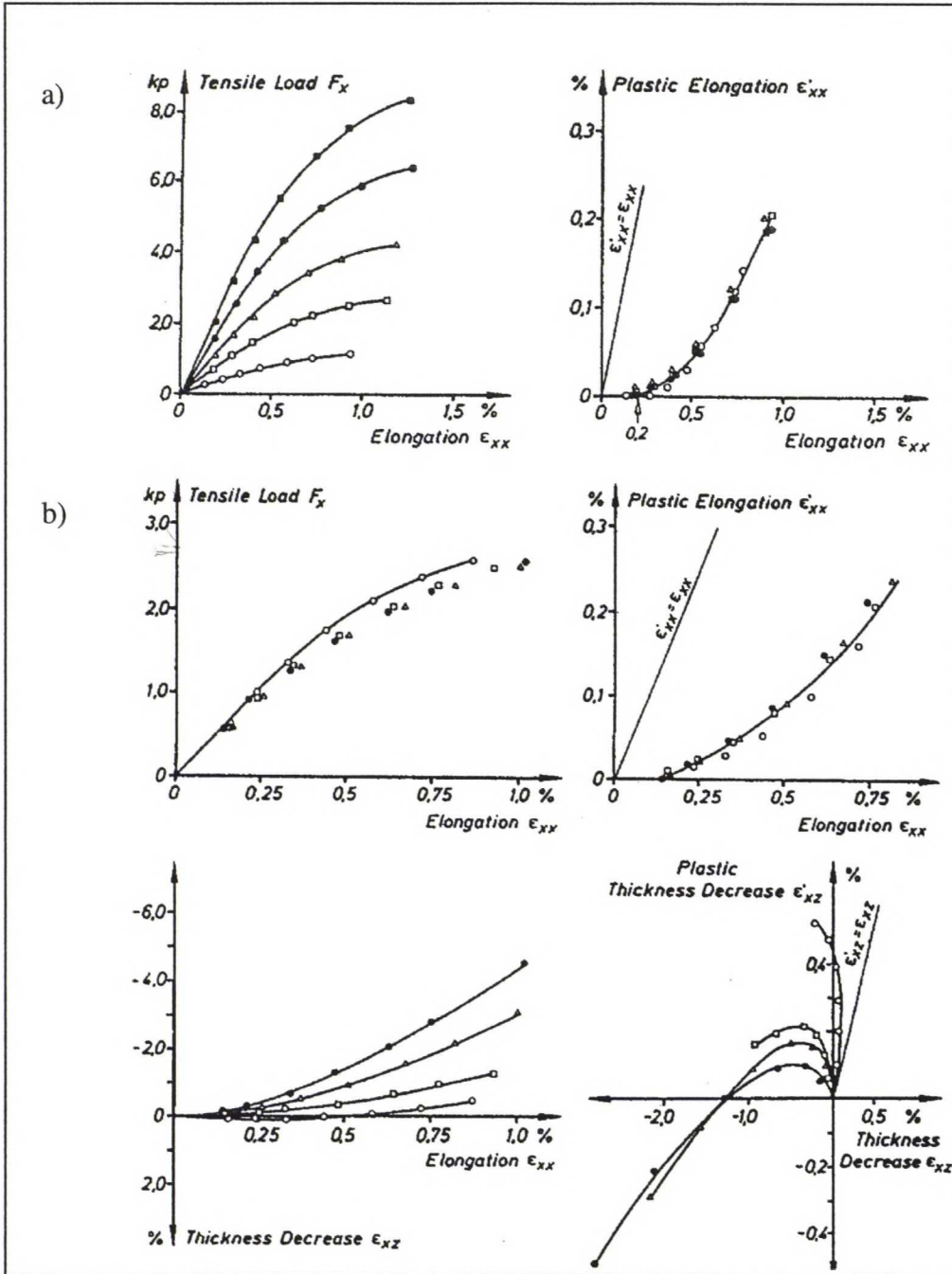
Paperikoneelta tuleva paperi on anisotropista, mikä johtuu mm. kuituorientaatiosta. Pääosa kuiduista on orientoitunut konesuuntaisesti, mikä johtaa suurempaan konesuuntaiseen taivutusjäykkyyteen konesuunnassa kuin poikkisuunnassa. Jos kuituorientaatio on poikkisuunnassa epätasainen, johtaa se paperin eri kohtien erilaiseen venymään koneella tapahtuvissa vedoissa, sillä kimmokerroin on riippuvainen kuituorientaatiosta /71/.

4.3.1 Paperin dimensiomuutokset vetorasituksessa

Paperin voima-venymä –käyttäytymistä on tutkittu vuosien saatossa paljon. Myös paperin paksuusmuutoksia vetorasituksen alaisuudessa on tutkittu, joskaan ei yhtä paljon kuin tasonsuuntaisia muutoksia. Götsching ja Baumgarten /72/ ovat tehneet systemaattista tutkimusta paperin eri dimensioiden muutoksista vetorasituksen

alaisuudessa. Eräässä kokeessa he varustivat perinteisen vetolujuusmittalaitteen paksuusmittauksella, jolloin tasonsuuntaisten muutosten lisäksi myös paksuusmuutosten tutkiminen oli mahdollista. Näiden eri dimensioiden muutosten tunteminen on tärkeää paperin jalostuksen ja käytön kannalta.

Göttschingin ja Baumgartenin koejärjestelyt on kuvattu viitteessä /72/. Kokeita on tehty sekä laboratorioarkeilla että valmiilla papereilla ja muuttujina ovat olleet mm. neliömassa, jauhatus, massakoostumus, kalanterointi ja paperin kuormitus. Paperin käyttäminen kone- ja poikkisuunnassa näytti noudattavan aikaisempia käsityksiä paperin muodonmuutoksista vedossa ja näiden kokeiden osalta voitiin tehdä johtopäätös, jonka mukaan plastinen muodonmuutos riippuu pelkästään kokonaisvenymästä, eikä siihen vaikuta paperin laatu eikä voiman vaikutussuunta. Paperin konesuuntaisen kokonaisvenymän ollessa alle 0,2 % tai vetorasituksen ollessa pienempi kuin 20 % murtolujuudesta plastista venymää ei tapahdu. Toisaalta kokonaisvenymän ylittäessä arvon n. 0,5 % kasvaa plastisen venymän osuus huomattavasti. Nämä päätelmät ovat havaittavissa kuvasta 25. Poikkisuunnan kurouman havaittiin seuraavan voiman vaikutussuunnassa tapahtuvia muutoksia. Plastinen muodonmuutos poikkisuunnassa tapahtuu vasta, kun venymä voiman vaikutussuunnassa on plastista.



Kuva 25. a) Muodonmuutokset vetokokeissa eri neliömassoilla ($kp = \text{kilopond} = 9.80665 \text{ N}$). Ensimmäinen alaindeksi kuvaa vedon suuntaa ja toinen muodonmuutoksen suuntaa. Merkkien selitykset: \circ 40 g/m^2 , \square 80 g/m^2 , Δ 120 g/m^2 , \bullet 160 g/m^2 , \blacksquare 200 g/m^2 . Mittaukset on tehty kuusihiokkeesta valmistetuilla laboratorioarkeilla. b) Kalanteroinnin vaikutus muodonmuutoksiin vetokokeissa (autotyypipainopaperi, 65 g/m^2). Kalanteroitu tiheyksiin \circ $0,55 \text{ g/cm}^3$, \square $0,62 \text{ g/cm}^3$, Δ $0,70 \text{ g/cm}^3$ ja \bullet $0,90 \text{ g/cm}^3$ /72/.

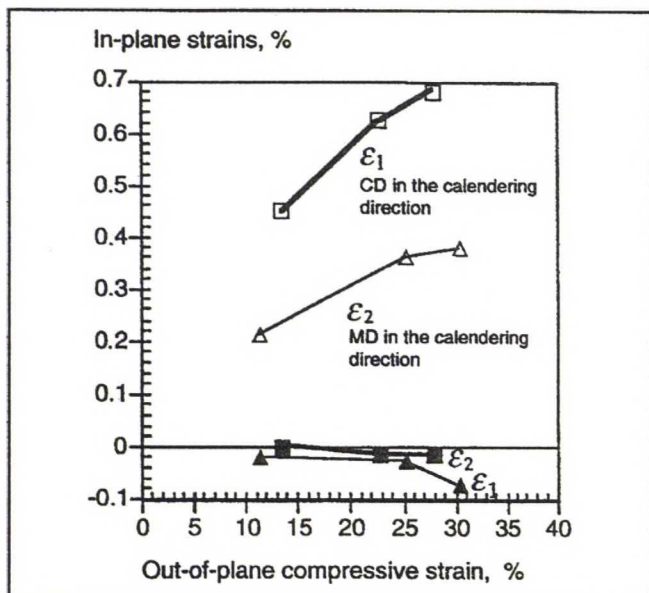
Tasonsuuntaiset muodonmuutokset tapahtuvat kuten monella muulla viskoelastisella materiaalilla, mutta paksuuden suhteen näin ei välttämättä aina käy. Mielenkiintoiseksi tutkimuksen tekee havainto, jonka mukaan paksuus kasvaa tietyllä vedon määrällä (kuva 25 b). Tämä tapahtuu erityisesti voimakkaasti kalanteroidulla paperilla, jonka tiheys on $0,90 \text{ g/cm}^3$. Paksuuden plastinen väheneminen on tällä paperilla maksimissaan $-4,6 \%$ eli paksuus kasvaa. Muissa tapauksissa paksuus pienenee oletetusti. Ilmiötä on selitetty mm. kuidun fibrillikulman ja lumenen sitoutumisasteen käyttäytymisellä kuitua vedettäessä, vetoa vastaan kohtisuorassa olevien kuitujen taipumalla tasosta poispäin poikkisuunnan kutistuman johdosta sekä vedon suunnassa olevien kuitujen venymisestä johtuvalla paperin rakenteen delaminoitumisella /72/. Göttching ja Baumgarten pitävät kahta jälkimmäistä selitystä luontevana ja tämän lisäksi suuremmalla venytyksellä paksuuden kasvun uskotaan johtuvan myös kuitusidosten murtumisesta.

5 PAKSUUSVANAN PAPERIFYSIKAALINEN TARKASTELU

5.1 Paperin deformatuminen kalanteroinnissa

Kalanteroitessa paperia se deformatuu lähinnä paksuussuunnassa, mutta samalla syntyy myös tason suuntaisia muodonmuutoksia. Riippuen lajista kalanterointi voidaan suorittaa joko kone-, super- tai pehmokalanterointina, mutta yhteistä näille prosesseille on niiden paperia muokkaava vaikutus paperin kulkiessa kalanterinipin läpi. Mekaanisten ominaisuuksien lisäksi kalanterointi vaikuttaa myös paperin pinnan rakenteeseen ja optisiin ominaisuuksiin.

Useissa tutkimuksissa /73, 74, 75/ on todettu, että kalanteroitessa paperiin aiheutuu suurempi pysyvä venymä poikkisuunnassa kuin konesuunnassa. Ilmiö voimistuu, kun puristuspainetta nostetaan. Lisäksi on todettu, että ensimmäisissä nipeissä paksuus pienenee voimakkaasti ja tasonsuuntaiset muutokset ovat selvempiä kuin viimeisissä nipeissä /74/. Kuvassa 26 on havainnollistettu tasonsuuntaisten muutosten suuruutta puristuspaineen funktiona.



Kuva 26. Tasonsuuntaisten pysyvien venymien muodostuminen puristuspaineen funktiona. Kuvassa tummat symbolit tarkoittavat valmiin paperin konesuuntaa ja vaaleat symbolit paperin poikkisuuntaa. Samassa kuvassa on vertailu kalanterointisuunnan vaikutuksesta tasonsuuntaisiin venymiin /73/.

Lif et al. ovat tutkineet tasonsuuntaisia muutoksia käyttäen ESP-tekniikkaa (Electronic Speckle Photography), joka pohjautuu digitaaliseen kuvankäsittelyyn /73/. Tutkimuksia on tehty sekä laboratorio- että pilot-kalanterilla ja tulokset ovat olleet samansuuntaisia. Koneensuuntainen venymä on lähes kokonaan puristuspainesta riippumaton ja saattaa jopa käydä niin, että paperi kutistuu lievästi konesuunnassa (kuvassa 26 tummat symbolit ϵ_1 , ϵ_2). Ilmiön on havainnut myös Baumgarten /75/, joka selittää ilmiön mm. kiillotuskalanterin aiheuttamalla kuivatuskutistumavaikutuksella. Ratakireyden nostolla kalanteroinnin yhteydessä ei näytä olevan merkittävää vaikutusta tasonsuuntaisiin muutoksiin, mutta kuten kuvasta 26 käy ilmi, paperin kalanterointi poikkisuunta edellä (kalanterointisuuntaan) kasvattaa paperin poikkisuunnan pysyvää venymää entisestään. Lif et al. mukaan tasonsuuntaisten venymien suuruus määräytyy suurelta osin siitä, missä suhteessa paperin anisotropia-akseli on kalanterointisuuntaan nähden /73/. Tätä näkemystä tukee myös Grattonin /74/ selitys, jonka mukaan kuidun sylinterimäinen rakenne edesauttaa poikkisuunnan venymien syntyä kuidun luhistuessa puristuspaineen alla. Tämä tarkoittaa teoriassa sitä, että paperissa oleva profiilivika johtaa sopivassa

tapauksessa paikallisesti suuremman poikkisuuntaisen venymän syntyyn, mikä voimistaa radan pussimaista purkautumista leikkurilla. Kuvan 26 pohjalta voidaan kuitenkin sanoa, että tasonsuuntaiset venymät ovat oleellisesti pienempiä kuin paksuussuunnassa tapahtuva kokoonpuristuminen. Paperi siis puristuu lähinnä kohtisuoraan (z-suunnassa) tilavuutta menettäen.

5.2 Paperin käyttäytyminen rullauspipissä

Paperin käyttäytyminen pipissä on kompleksinen ilmiö, jonka matemaattinen mallintaminen on osoittautunut melko hankalaksi. Ensimmäisenä nippikontaktia tutki Hertz (1882), joka kehitti yksinkertaistetun mallin kuvaamaan nipin leveyttä ja siinä vaikuttavaa jännitystä /5/. Myöhemmin rullaustapahtumaa ovat tutkineet mm. Roisum /5, 22/, Koskimies /8/, Pfeiffer /6,7,76/, Hakiel /77/ ja Guldenberg /78/, jotka ovat pyrkineet selittämään ja mallintamaan rullan sisäisiä jännityksiä ja nippikontaktia rullaustapahtumassa.

Kun rullaus tapahtuu tasossa ja kahta symmetristä ja homogeenistä sylinteriä painetaan toisiaan vasten, vaikuttaa näiden muodostamassa pipissä puristava voima, joka on muodoltaan paraabeli ja symmetrinen sylintereiden kautta piirretyn akselin suhteen siten, että suurin puristava voima vaikuttaa nipin keskellä. Nipin leveys ja sen aiheuttama jännitys ovat verrannollisia nippikuorman neliöön /5, 22/. Koskimies /8/ puolestaan tarkastelee rullaussylinterin ja rullan muodostamaa nippiä hyvin yksityiskohtaisesti ja toteaa sen olevan epäsymmetrinen johtuen hystereesistä säteen suuntaisen deformaation muodostumisen ja palautumisen välillä. Tätä väitettä tukevat myös Pfeifferin havainnot pinopuristuskokeissa.

Kappaleessa 2.2.2 on esitetty mekanismi, jolla rullauspippi vaikuttaa muodostuvan rullan kireyteen (kuva 5). Jos pipissä ei tapahdu luistoa, voidaan stationäärisesti virtaavan rainan nopeuden ja venymän välinen yhteys ilmaista seuraavasti /8/:

$$\frac{dv}{v} = d\varepsilon \quad , \quad (6)$$

missä

v on rainan nopeus (m/s) ja

ε on venymä (%).

Jos yhtälöön (6) sijoitetaan kuvan 5 termit olettaen, että $dv = \Delta v = v_r - v_t$ ja $d\varepsilon = \Delta\varepsilon = (\varepsilon - 0)$, voidaan venymämuutos kirjoittaa nopeuden suhteellisenä muutoksena

$$\varepsilon = \frac{v_r - v_t}{v_t}, \quad (7)$$

missä

v_r on konerullan kehänopeus ja

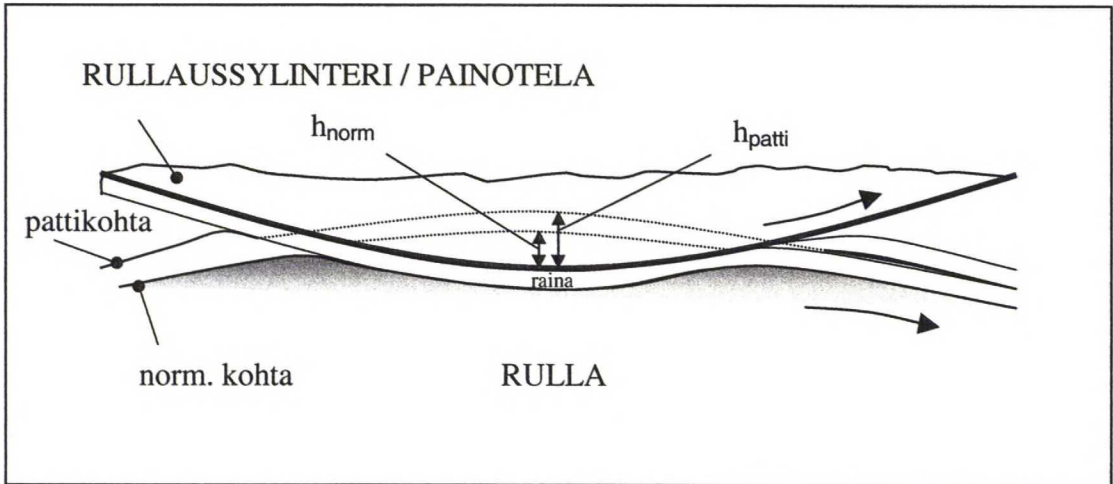
v_t on rullaussylinterin kehänopeus.

Jos kehänopeus ilmoitetaan *kulmanopeuden* ω ja *säteen* r avulla ja merkitään $v_t = \omega_t r_t = \omega_r (r_r - h)$, saadaan yksinkertaistettu yhtälö venymälle ε yhtälöstä (7):

$$\varepsilon = \frac{\omega_r r_r - \omega_t r_t}{\omega_t r_t} = \frac{\omega_r r_r - \omega_r (r_r - h)}{\omega_r (r_r - h)} = \frac{h}{r_r - h} = \frac{h}{r_r}, \quad (8)$$

kun $r_r \gg h$.

Yhtälön (8) perusteella voidaan todeta, että konerullassa oleva suuremman halkaisijan alue, joka joutuu kantamaan suuremman osan nippikuormasta kuin viereiset alueet, joutuu suuremman venymän kohteeksi, sillä tässä pattikohdassa *painauma* h on suurempi kuin viereisillä alueilla. Tätä ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 27 (mittasuhteet eivät vastaa todellista tilannetta).



Kuva 27. Pattigeometriaa rullaussylinterin ja konerullan muodostamassa nipissä.

Kuvassa 27 on oletettu, että rullaussylinteri on kontaktissa koko radan leveydellä rullan pintaan. Tämä on käytännössä tilanne rullauksen alkuvaiheessa rullan halkaisijan ollessa pieni. Jos sylinteri tai painotela on terästä, sen kimmokerroin on huomattavasti korkeampi kuin paperilla ja se pysyy patti-nipissä käytännössä lähes suorana. Tällöin yhtälön (8) avulla voidaan laskea nopeuden aiheuttama *venymäero* $\Delta\varepsilon$ patti- ja normaalikohdan välillä olettaen, että $r_{patti} = r_{norm} = r_r$:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{patti} - \varepsilon_{norm} = \frac{1}{r_r} (h_{patti} - h_{norm}) \quad . \quad (9)$$

Riippuen halkaisijavaihtelun voimakkuudesta ennemmin tai myöhemmin saattaa käydä niin, että profiilivikojen kertaantuessa suuremman halkaisijan alueet joutuvat kannattelemaan konerullaa rullaussylinteriä vasten, jolloin puristus-paine kohdistuu entistä enemmän näihin patti-kohtiin. Rullaussylinterin painuessa konerullaa vasten muodostuu nipin etupuolelle valli, joka on patti-kohtalla suurempi kuin normaalikohdassa. Kuten kalanterin nipissä, rullan pintaan kohdistuvalla voimalla on myös poikkisuuntaisia komponentteja, jotka pyrkivät levittämään rataa ja sen alla olevaa pattia. Analogia ilmiöön löytyy taikinan kaulinnasta.

Se, kuinka suuren puristusefektin kohteeksi tällainen pattikohta joutuu, riippuu mm. patin suhteellisesta korkeudesta ja rullattujen paperikerrosten z-suuntaisesta kimmokertoimesta. Pfeiffer on käsitellyt aihetta teoreettisesti esimerkin valossa, jossa hän olettaa halkaisijavaihteluiden johtuvan 4 %:n paksuus- ja neliömassavaihtelusta /76/. Jos rullan halkaisija kasvaisi samassa suhteessa, se tarkoittaisi 4 cm:n heittoa rullassa, jonka normaali halkaisija on yksi metri. Pfeiffer olettaa, että rulla säilyy sylinterimäisenä, jolloin paksumpi kohta joutuu puristumaan 4 % muuta rullaa enemmän. Kaavan (3) avulla hän on laskenut suhteellisen painelisäyksen pattikohdassa, kun vakio K_2 on 32 ja puristuma ε vaihtelee rullassa välillä 4-8 %. Paine on tällä tavoin laskettuna 3,8-4,6 kertaa suurempi pattikohdassa ja ilmiö voimistuu entisestään, jos vakio K_2 saa suurempia arvoja. Käytännössä tämä ilmiö voimistuu vaikeasti kokoonpuristuvilla lajeilla.

Eräs ratkaisu, jolla rullaussylinteri saadaan pysymään paremmin kiinni konerullassa, on pehmeän pinnoitteen käyttö rullaussylinterin pinnalla. Pehmeä pinnoite mukautuu paremmin paikallisiin profiiliepätasaisuuksiin, mikä johtaa paikallisten venymäerojen tasoittumiseen (kaavassa (9) $r_{\text{patti}} > r_{\text{norm}}$ ja h_{patti} pienenee) ja nippipaineen laskuun. Samalla myös nipin leveys kasvaa, mikä vaikeuttaa ilman pääsyä nipin läpi. Ongelmana on lähinnä ollut pehmeän pinnoitteen kovaa pintaa heikompi kestävyys.

5.3 Paksuusvanan käyttäytyminen eri tuotantovaiheissa

Paperikoneella syntyvän halkaisijavaihtelun käyttäytymistä eri rullausvaiheissa ei ole tutkittu kovin systemaattisesti. Kirjallisuudessa on olemassa kuvauksia yksittäisistä prosessivaiheista, joissa kuvataan profiilivaihteluiden luonnetta, mutta läpi koko linjan ulottuvaa seuranta ei juuri ole tehty. Siksi ilmiöiden selittäminen on monissa yhteyksissä enemmänkin käytännön tuntuman varassa. Lisäksi on tärkeää täsmentää, mistä rullausvaiheesta on kyse, kun puhutaan kireydestä, mikä vaikeuttaa mm. viitteessä /67/ esitettyjen väittämien tulkintaa.

Monien havaintojen perusteella on todettu, että paksumpi kohta rullassa säilyy aina paperikoneelta painotaloon asti. Paksuusprofiilissa olevia vaihteluita voidaan tietyissä

rajoissa tasoittaa esimerkiksi off-line –kalanteroinnissa, mutta monesti toisen vian korjaaminen johtaa toisen voimistumiseen. Ehkä merkittävin muutos paksun kohdan käyttäytymisessä tapahtuu sen kireydessä, joka saattaa vaihdella lajista ja prosessista riippuen ääripäästä toiseen.

5.3.1 Paperikonelinja

Kuten kappaleessa 4.3 todettiin, näkyy paperikoneella tuleva paksuusvana paikallisena kireyspiikkinä, jota voidaan kompensoida mm. kosteuden nostolla. Kalanteroitaessa paksu kohta joutuu useimmiten suuremman puristuksen kohteeksi, minkä vuoksi se venyy muita kohtia enemmän. Venymän suuruus riippuu oleellisesti myös nippiprofiilista, lämpötilasta ja kosteudesta. Konekalanterin kovassa nipissä radan kireyden on todettu laskevan kohdassa, jossa puristus on suurempaa /79/. Kiillotuskalanterilla, jossa osa teloista on pehmeitä ja nippien pituudet ovat suurempia kuin kovassa nipissä, puristuksen lisäyksen on puolestaan havaittu nostavan kireyttä esimerkiksi SC-paperilla /67, 29/. Parolan et al. /67/ mukaan suuremman kuormituksen alueella kireys kasvaa, mikä johtunee radan kulkemasta pidemmästä matkasta aukirullauksesta kiinnirullaukseen (vrt. kuva 27). Tämän johtopäätöksen mukaan matkan lisäys kompensoisi puristuksesta aiheutuneen venymän. VTT:ssä tehdyn melko kattavan tutkimuksen mukaan leikkurin aukirullauskireyden ja kiillotetun rullan kovuuden välillä on selvä negatiivinen korrelaatio /67/. Tämä tarkoittaa sitä, että suuremman puristuksen alueilla kireys kasvaa ja paksuus pienenee. Tähän tulee suhtautua varauksella, sillä esimerkiksi höyrytyksen paikallinen lisääminen saa aikaan saman ilmiön. Normaalilla paksummilla alueilla puolestaan konerullan puristus- ja tangentialinen jännitys sekä halkaisija kasvavat ja kiillotettua konerullaa aukirullattaessa suuremman halkaisijan alueelta paperi purkautuu suuremmalla kehänopeudella, mikä näkyy varsinkin leikkurilla radan elämisenä ja alhaisempina kireytenä. Myös aikaisemmin mainittu kireän kohdan suhteellisesti suurempi relaxaatio johtaa paikalliseen kireyden laskuun. Kireyden mittausta ja luotettavien tulosten saanti ennen kiillotuskalanterin kiinnirullainta on vaikeaa, sillä levitystelalla on voimakas vaikutus kireysprofiilin muotoon ennen kiinnirullainta.

5.3.2 Painotalo

Painotalossa tehtyjen mittausten mukaan painatuksessa kireys korreloi parhaiten leikkurin kireyden kanssa /67/. Paperikoneella mitattujen kireysprofiilien muodot siirtyvät painokoneelle, mutta kiillotetuilla lajeilla kalanterin vaikutus kireyteen on merkittävä nippikuorman ja höyrytyksen vuoksi. Myös painokoneen telastolla voidaan vaikuttaa kireysprofiiliin, jos rullien lähtöprofiileissa on vinoutta kuten reunarullissa. VTT:n projektin yhteydessä tutkittiin noin 5000 rullan ajettavuutta painossa ja tulosten mukaan löysien ja kireiden kohtien ratakatkoja lisäävä vaikutus on selvä. Muita ilmenneitä ongelmia olivat kohdistusvirheet, vekiä ja sivuttaissiirtymät.

KOKEELLINEN OSA

6 TAVOITE

Kokeellisen osan tavoitteena oli perehtyä mittausmenetelmiin, jotka voisivat olla käyttökelpoisia konerullan halkaisijavaihteluita aiheuttavan rullavanan havaitsemisessa. Tällä tavoin päästäisiin analysoimaan kvantitatiivisesti rullan rakennetta ja paperin ominaisuuksia, jotka ovat halkaisijavaihteluiden kannalta merkittäviä.

Kokeellinen osa jakautui kahteen osaan siten, että ensin pyrittiin esikokeilla varmistamaan ennalta valittujen mittausmenetelmien soveltuvuus rullavanan havaitsemiseen. Varsinaisilla kokeilla pyrittiin sitten mittaamaan muutoksia, joita päällystämättömän painopaperin konerullassa tapahtuu kalanteroinnin seurauksena. Alkuperäinen tavoite oli keskittyä on-line –kalanteroituun lajiin, mutta sopivan kohteen puutteessa työn tavoite muutettiin koskemaan off-line -kalanteroitua paperia.

Kirjallisuusosan pohjalta päädyttiin valitsemaan tietyt olemassa olevat menetelmät analyysien tekoon. Valinta tehtiin siten, että tärkeimmät paperin ja konerullan rakennetta tai ominaisuutta kuvaavat osa-alueet voitiin kattaa. Luonnehdinta tehtiin tarkastelemalla sekä rakenne-, ominaisuus- että tilasuureita.

7 MITTAUSMENETELMÄT JA KÄYTETYT MATERIAALIT

Työssä käytetyt mittausmenetelmät on lueteltu taulukossa 4. Tarkemmat selvitykset menetelmistä ovat liitteissä 1-6. Tämän lisäksi paperikoneilta kerättiin tietoja eri ajoparametreista ja on-line –mittausten profiileista. Työn alussa käytiin läpi kaikkiaan yli 20 vaihtoehtoa sopivien mittausmenetelmien löytämiseksi. Näistä karsittiin haastatteluiden, käytännön kokemusten ja tieteellisten tutkimusten pohjalta joukko menetelmiä, joiden toimivuutta rullavanan havaitsemiseksi kokeiltiin käytännössä. Osa mittauksista, joiden käyttöönottoa suunniteltiin tutkimuksen alussa, jouduttiin jättämään pois teknisten ongelmien ja korkeiden kustannusten vuoksi. Tämän lisäksi varsinaisissa

kokeissa mitattiin paperin kutistumaprofiili kiillottamattomasta paperista sekä kone- että poikkisuunnassa, mutta mittaustuloksista ei löytynyt mainittavaa yhteyttä rullavanan esiintymiseen.

Esikokeissa mittaukset suoritettiin on-line -kalanteroidusta LWC-paperista, jonka neliömassa oli 54 g/m² ja off-line -kalanteroidusta SC-A -paperista, jonka neliömassa oli 56 g/m². Lopulliset määritykset vanaisesta paperista tehtiin off-line -kalanteroidulla SC-B -paperilla, jonka neliömassa oli 52 g/m². Luottamuksellisten tietojen ja yhteistyötahojen toivomuksen vuoksi käytettyjä materiaaleja ei käsitellä tässä yhteydessä tarkemmin.

Taulukko 4. Työssä käytetyt mittausmenetelmät. Tarkempi selvitys käytetyistä menetelmistä löytyy liitteistä 1-6.

Menetelmä	Mitattava ominaisuus
Tapio-analysointori	Kone- ja poikkisuuntainen paperin analysointi.
Lorenzen & Wettre TSO	Paperin poikki- ja konesuuntaisen vetojäykkyyden ja orientaatiokulman määrittäminen.
KCL-PURRE	Paperin kokoonpuristuminen z-suunnassa.
Rainan leikkaus osarainoihin	Paperin pituusprofiilin mittaus.
PAROtester2	Rullan kovuusprofiilin määrittäminen.
IQTension -leijuntalista	Liikkuvan rainan kireysprofiilin määrittäminen.
Lämpökamera	Konerullan lämpötilaprofiilin mittaus.

8 ESIKOKKEET

8.1 Kokeiden tarkoitus

Esikokeiden tarkoituksena oli testata ennalta valittujen mittausten menetelmien soveltuvuutta halkaisijavaihteluita aiheuttavien paperin ominaisuuksien havaitsemiseen. Kokeiden tarkoituksena oli myös selvittää, ovatko voimakkaasti kalanteroiduilla, päällystämättömillä papereilla vaihtelut selvemmin havaittavissa kuin päällystetyillä papereilla. Lisäksi esikokeissa oli tarkoitus testata työn teettäjän ehdottamaa menetelmää, jolla voitaisiin mahdollisesti analysoida paperin ominaisuuksien vaikutusta valmiin rullan dimensioihin. Ehdotuksen mukaan konerullasta, jossa ilmenee halkaisijavaihteluita, otetaan pituusleikattu rulla ja tämä rulla leikataan edelleen kapeammiksi rulliksi siten, että rullassa esiintyvä suuremman tai pienemmän halkaisijan alue tulee omalle rullalleen kokonaisuudessaan. Vertailemalla tällaisten kapeiden rullien dimensioita sekä koneelta ja laboratorion saattavia profiilitietoja keskenään voitaisiin jollain tavalla selittää rullissa ilmeneviä vaihteluita.

8.2 Esikokeiden suoritus ja tulokset

Esikokeisiin valittujen mittausten kuvaukset on esitetty liitteissä 1-6 ja osittain myös varsinaisten kokeiden yhteydessä. Esikokeissa päädyttiin tarkastelemaan rullavanaa paperikoneilla, joissa etukäteistiedon mukaan oli ollut rullausta haittaavia profiilivaihteluita. Paikanpäällä tilanne ei ollut kuitenkaan ennakkotietojen mukainen ja siksi esikokeet jouduttiin suorittamaan senhetkisten, lähes normaalien, laatuvarusteluiden puitteissa.

Esikokeissa mitattiin SC- ja LWC-paperista neliömassa, paksuus, kiilto, transmissio ja tuhka Tapio-analysointilaitoksella. Tämän lisäksi mitattiin vetojäykkyydet (TSI) sekä koneetta poikkisuunnassa ja vetojäykkyyden orientaatiokulma (TSO). Kireysprofiilit mitattiin pilot-kalanterin yhteyteen asennetulla IQTension™ -mittapalkilla Metso Paper Oy:n tutkimuslaitoksella Järvenpäässä. Tehdasoloissa rullista mitattiin kovuus- ja lämpötilaprofiileja. Esikokeissa ei suoritettu kokoonpuristumismittauksia, sillä

kokoonpuristumismääriä varten ei oltaisi pystytty valmistamaan sopivia näytepalloja vanojen ollessa kapeita ja liian lähellä toisiaan.

8.2.1 Tapio-analyysit

Tapio-analysointilla tehdyistä mittauksista on esitetty oleelliset tulokset liitteissä 7 ja 8. Tässä yhteydessä käsitellään muutama esimerkkitapaus, joilla pyritään selvittämään mittausmenetelmän soveltuvuutta vanaisuuden analysointiin. Esikokeissa suurin mielenkiinto kohdistui lähinnä sen mittaustarkkuuteen, koska profiilivaihtelut eivät olleet niin suuria, että ne olisivat häirinneet tuotantoa.

Esikokeissa analysoitiin sekä SC- että LWC-koneelta otettuja poikkiratanäytteitä. Kohta, jossa havaittiin selvää halkaisijavaihtelua valittiin tarkemman tutkimuksen kohteeksi. SC-koneella paikannettiin pienemmän halkaisijan alue ja aivan tämän vieressä normaalia suuremman halkaisijan alue. LWC-koneella oli havaittavissa pelkästään rullavana, jonka halkaisija oli viereisiä alueita suurempi. Taulukossa 4 on ilmoitettu esikokeissa tutkittujen vanojen huiput. Näitä huippuja on merkitty profiilikuvissa punaisella neliöllä (kuoppa) ja sinisellä kolmiolla (patti). Konerullissa esiintyneet halkaisijavaihtelut olivat suuruusluokkaa 3 mm ja vanojen leveydet SC-konerullassa olivat 2-3 cm ja LWC-konerullassa n. 5 cm.

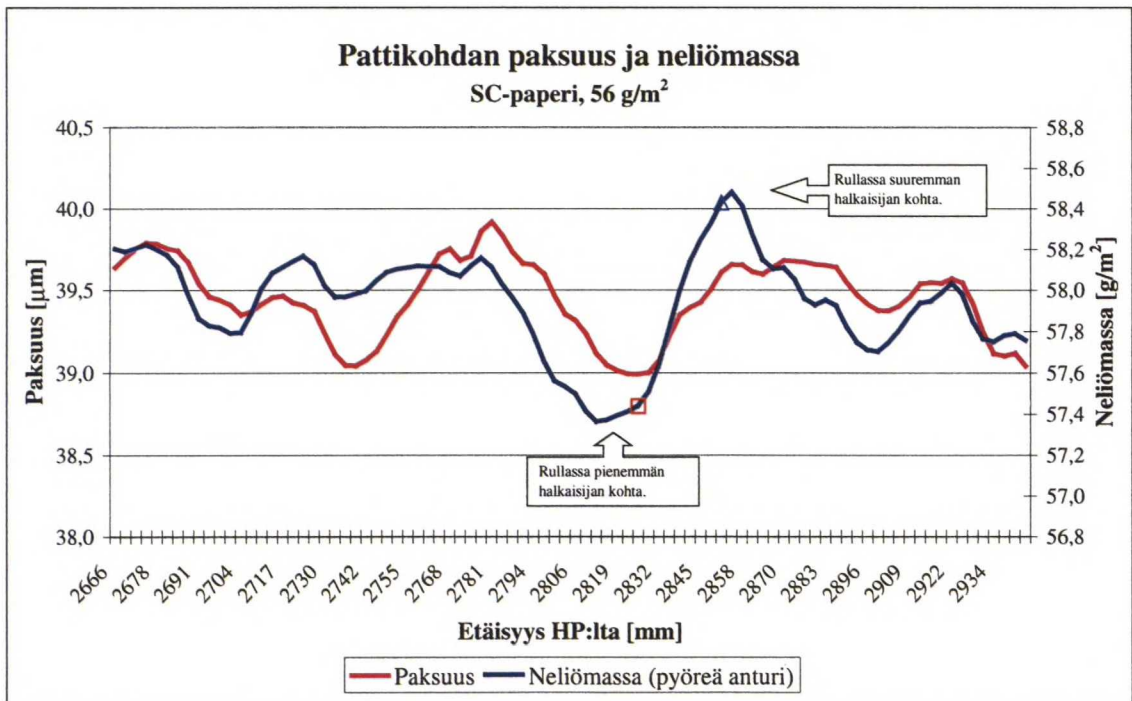
Taulukko 4. Konerullassa esiintyneiden rullavanojen sijainti esikokeissa.

Laji	Patti / Kuoppa	Huippu etureunasta [cm]
SC	Patti	285
SC	Kuoppa	283
LWC	Patti	35

Kuvassa 28 on esitetty SC-paperin paksuus- ja neliömassaprofiili 20 poikkiratanäytteen keskiarvona ja mittavälillä 3,2 mm. Tästä kuvasta käy hyvin ilmi vanan ilmenemiskohta ja sen muoto, joka on kuvan 11b kaltainen. Tapion mittaustuloksista voitiin päätellä, että kyseessä oli todennäköisesti määränpään virtaushäiriöstä johtuva neliömassavirhe, joka näkyi varsin hyvin Tapio-mittauksissa. Paksuusprofiilissa vastaava kohta ei

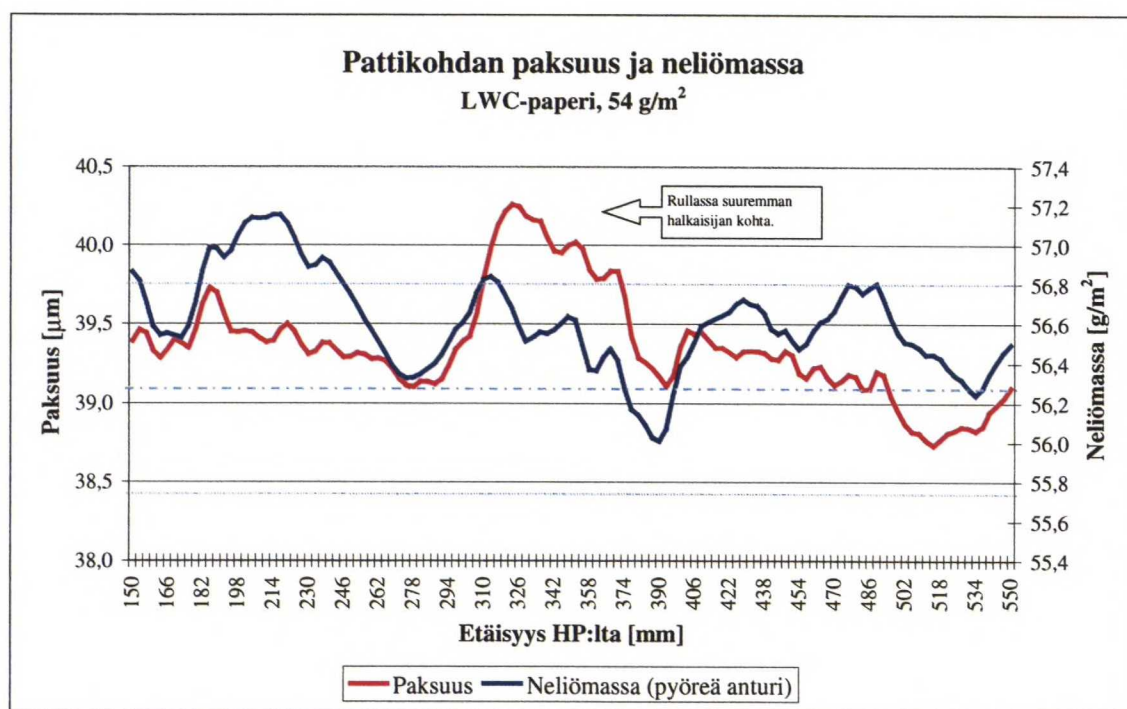
näkyntä läheskään yhtä selvänä, joten oletettavasti kalanteroinnilla oli pystytty tasoittamaan paksuutta tässä kohdassa, mikä puolestaan oli johtanut tiheyserojen voimistumiseen. Tiheyserojen muodostumiseen ja sitä kautta paperin kokoonpuristumiseen on myös saattanut vaikuttaa paperin tuhkan epätasainen jakautuminen, mikä näkyy tuhkaprofiileista.

Vaikutelmaa patin olemassaolosta lisää jyrkkä muutos neliömassaprofiilissa ääripäästä toiseen. Vana erottui hyvin myös koko neliömassaprofiilia tarkasteltaessa ja varsinkin suorakulmaisella mittaussaukolla mitatusta neliömassaprofiilista näki selvästi profiilipoikkeaman. Tällä anturilla mitatussa profiilissa pienimittakaavainen vaihtelu oli selvästi vähäisempää kuin pienemmän anturin mittaustuloksissa. Samalla neliömassaprofiilikuvista nähdään eri antureiden välinen tasoero, joka johtui todennäköisesti kalibroinnista. Näistä suorakulmaisen neliömassa-anturin arvot olivat lähempänä tavoiteneliömassaa.



Kuva 28. SC-paperin paksuus- ja neliömassaprofiili. Neliömassaprofiili on mitattu pyöreällä anturilla (mittausaukon halkaisija 2 mm). \square = kuoppa, Δ = patti, HP = koneen hoitopuoli eli etureuna.

Kuvassa 29 on esitetty osa LWC-paperilla mitatuista paksuus- ja neliömassaprofiileista. LWC:n tapauksessa voidaan Tapio-mittausten perusteella todeta, että kyseessä oli tiheyspoikkeama, joka johtui kuluneista kiillotuskalanterin teloista. Tätä päätelmää tukee myös kalanterin telojen visuaalinen tarkastelu, joka osoitti teloissa olevan kulumia. Etenkin koneen etureunassa oli kohtia, joissa puristus oli paikallisesti pienempi ja näin ollen valmiin paperin paksuus oli jäänyt viereisiä alueita suuremmaksi. Sekä yksittäistä profiilin kohtaa että koko profiilia tarkasteltaessa oli nähtävissä selvä poikkeama paperin paksuudessa, kun taas neliömassassa poikkeama ei ollut läheskään yhtä selvä. Tiheyspoikkeamaa indikoivat myös normaalia alhaisemmat tiheys-, kiilto- ja transmissioprofiilin arvot rullavanan kohdassa.



Kuva 29. LWC-paperin paksuus- ja neliömassaprofiili. Keskellä oleva katkoviiva kuvaa paksuusprofiilin keskiarvoa ja yhtenäiset ohuet viivat ovat tasolla 2*keskihajonta.

Tarkasteltaessa kuvien 28 ja 29 mitta-asteikkoja nähdään, että erot eivät olleet suuria, mutta ne olivat selvästi havaittavissa jo tilanteessa, jossa ne eivät häirinneet tai pysäyttäneet tuotantoa. On huomattava, että keskiarvoprofiileissa profiilipiikit tasoittuvat ja käytetyssä Tapio-analysaattorissa oli asetusravona

alipäästösuodatustaajuus 23,5 Hz, mikä vaikuttaa profiilien muotoon. Vaikutus näkyi lähinnä kapeiden profiilipiikkien muodossa. Lisäksi LWC-paperinäytteet otettiin konerullasta, jota ei oltu oskilloitu, kun taas SC-paperinäytteet otettiin oskilloidusta konerullasta (oskillointi ± 1 cm). Keskiarvoprofiileilla pystytään kuitenkin saamaan esille stabiilit vanat, jotka ovat rullauksen kannalta haitallisimpia. Vakioasetuksena ollut mittaväli 3,2 mm oli riittävä vanaisuuden analysoinnissa.

8.2.2 Vetojäykkyys (TSI) ja sen orientaatiokulma (TSO)

Vetojäykkyyksmittaukset suoritettiin Metson Paper Rautpohjan käytännön mukaisesti kolmesta poikkiratanäytteestä. Näiden tulosten perusteella ei voitu tehdä selvää johtopäätöstä siitä, riittääkö laitteen tarkkuus tutkittavien vaihteluiden mittaamiseen, sillä mittaukset tehtiin mittavälillä 50 mm. Mittaväli osoittautui liian suureksi etenkin SC-näytteiden kohdalla, sillä halkaisijavaihtelut tapahtuivat tätä kapeammalla välillä.

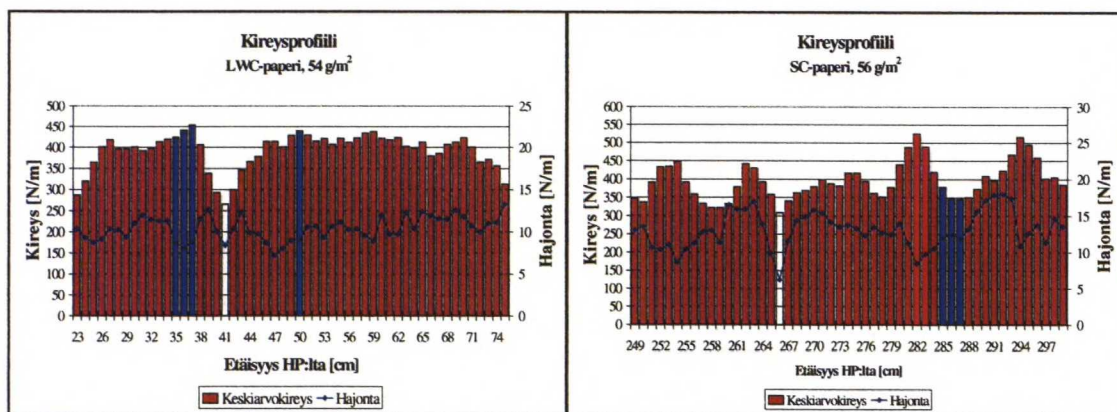
Tuloksista voitiin kuitenkin todeta, että vetojäykkyysvaihtelut konesuunnassa ovat huomattavasti selvempiä kuin poikkisuunnassa, joten mahdollisten paksuus-, venymä- tai kutistumaerojen tulisi näkyä konesuunnan profiilissa. SC-paperilla vetojäykkyyden orientaatiokulmassa oli havaittavissa selvä paikallinen poikkeama, mikä tukisi näkemystä, että profiilivirhe olisi lähtöisin märänpään virtaushäiriöstä, joka on muuttanut kuitujen orientaatiokulmaa paikallisesti. Kuitujen orientaatiokulmalla on puolestaan suuri vaikutus vetojäykkyyden orientaatiokulmaan. LWC-paperilla ei ollut havaittavissa selvää poikkeamaa vetojäykkyydsprofiilissa.

8.2.3 Ratakireysprofiili

Kireysmittaukset suoritettiin leikatuista asiakasrullista, sillä se oli ainoa mahdollisuus tehdä mittaukset riittävän luotettavasti ja tarkasti. LWC-koneella oli asennettuna kaksi vastaavanlaista kireysmittauspalkkia kuin käytetyssä pilot-laitteistossa, mutta niiden tarkkuus ei ollut riittävä eikä niiden luotettavasta toiminnasta ollut varmuutta. SC-koneella ei ollut mahdollisuutta mitata kireysprofiilia.

Kireysmittausta varten tehtaalla leikatut rullat kavennettiin, jotta ne voitiin ajaa pilot-laitteiston läpi. Kireydet mitattiin SC-rullasta, jonka leveys oli 52 cm ja LWC-rullasta, jonka leveys oli 54 cm. Mittaukset suoritettiin pilot-kalanterin yhteyteen asennetulla IQTension™ -mittapalkilla, jossa mittausantureiden väli oli 1 cm maksimileveyden ollessa 55 cm. Tuotantokoneilla mittausväli on yleensä 10-30 cm riippuen radan positiosta ja halutusta tarkkuudesta, joten on selvää, että kapeiden vanojen havainnointi on siinä tapauksessa mahdotonta. Mittausten aikana nopeus- ja kireysasetukset pidettiin vakioina.

Kuvassa 30 on esitetty kireyden poikkiprofiilien keskiarvot ja hajonnat, jotka on laskettu laitteiston keräämien mittausten pohjalta. Laskennassa ei ole mukana rullan kiihdytys- ja hidastusvaiheita. Lisäksi mittausten aikana huomattiin, että yhden anturin ympäristössä mittaus näytti todellista alhaisempia arvoja, minkä myöhemmin todettiin johtuneen palkin rakenteellisesta viasta. Tämä kohta näkyy profiileissa värittömänä palkkina. Mittausten aikana oli myös havaittavissa radan liikkumista poikkisuunnassa, joka oli suuruudeltaan n. 1 cm:n luokkaa.



Kuva 30. Kireysprofiilit rullavanan kohdalta pituusleikatuista rullista. Profiileissa on merkitty sinisellä suuremman halkaisijan aluetta ja punaisella pienemmän halkaisijan aluetta. Väritön palkki kuvaa kohtaa, jossa palkki ei näyttänyt todellista kireyttä.

Kuvista nähdään selvästi, että SC-paperilla kireysvaihtelu oli huomattavasti suurempaa ja helpommin havaittavissa kuin LWC-paperilla. SC-rullan kireysprofiiliin on merkitty punaisella tarkemman tutkimuksen kohteeksi otettu pienemmän halkaisijan alue ja

sinisellä suuremman halkaisijan alue. Tästä nähdään hyvin näiden alueiden välillä vallitseva huomattava kireysero, joka oli n. 150 N/m poikkiprofiilin hajonnan ollessa 51 N/m. Kuvista ilmenee myös käytetyn mittausten menetelmän tarkkuus, sillä se kykenee erottamaan hyvin jyrkät muutokset lyhyellä matkalla rainan poikkisuunnassa. Tämän lisäksi poikkisuunnan hajontaprofiili antaa melko hyvän kuvan vanojen stabiilisuudesta. Varsinkin SC-paperilla pienemmän halkaisijan alue oli aukirullaustilanteessa huomattavasti stabiilimpi, kun taas paksumman halkaisijan alueella profiili ei säilyttänyt muotoaan ja positiotaan rullausvaiheen aikana. Tämä johtui osittain kiillotuskalanterin oskilloinnista, mikä vaikeutti erityisesti vanan paikantamista poikkisuunnassa.

LWC-rullan kireysprofiili on muodoltaan mielenkiintoinen. Suuremman halkaisijan alueelta paperi purkautui rauhattomasti, mutta rullauksen yhteydessä ei ollut havaittavissa selvää löysää ja pussimaista kohtaa rainassa. Tämä johtui todennäköisesti rullavan syntyvästä ja siitä, että suuremman halkaisijan alueelta paperi purkautui suuremmalla kehänopeudella. Koska paksuusvana oli syntynyt kuluneiden kalanterin telojen vuoksi, se ei ollut joutunut nipissä yhtä suuren ja rainaa paikallisesti venyttävän puristuksen kohteeksi kuin viereiset alueet. Kireysprofiilissa tämä alue näkyi muita alueita hieman kireämpänä kohtana, mutta mittauksista on saattanut häiritä aikaisemmin mainittu mittauspisteen viereen osunut häiriökohta (profiilissa väritön tolppa). Tämän lisäksi on saattanut käydä niin, että paksuusvanan kohta on osittain relaxoitunut paperin ollessa rullalla ja tämä on johtanut kireyspiikin tasoittumiseen. Paperissa oleva alhaisemman tiheyden alueen on myös saattanut menettää paksuuttaan rullalla ollessaan, mikä on johtanut puristusjännityksen ja tangentialisen jännityksen laskuun ja sitä kautta vaimentanut paperin relaxoitumista tässä kohdassa. Kuvien tulkinnessa on myös muistettava LWC- ja SC-paperin lajikohtaiset erot, joihin vaikuttavat mm. pohjan muodostus ja itse valmistusprosessi. Kuvista on nähtävissä esimerkiksi myös päällysteen profiilia tasoittava vaikutus.

8.2.4 Rullan kovuus

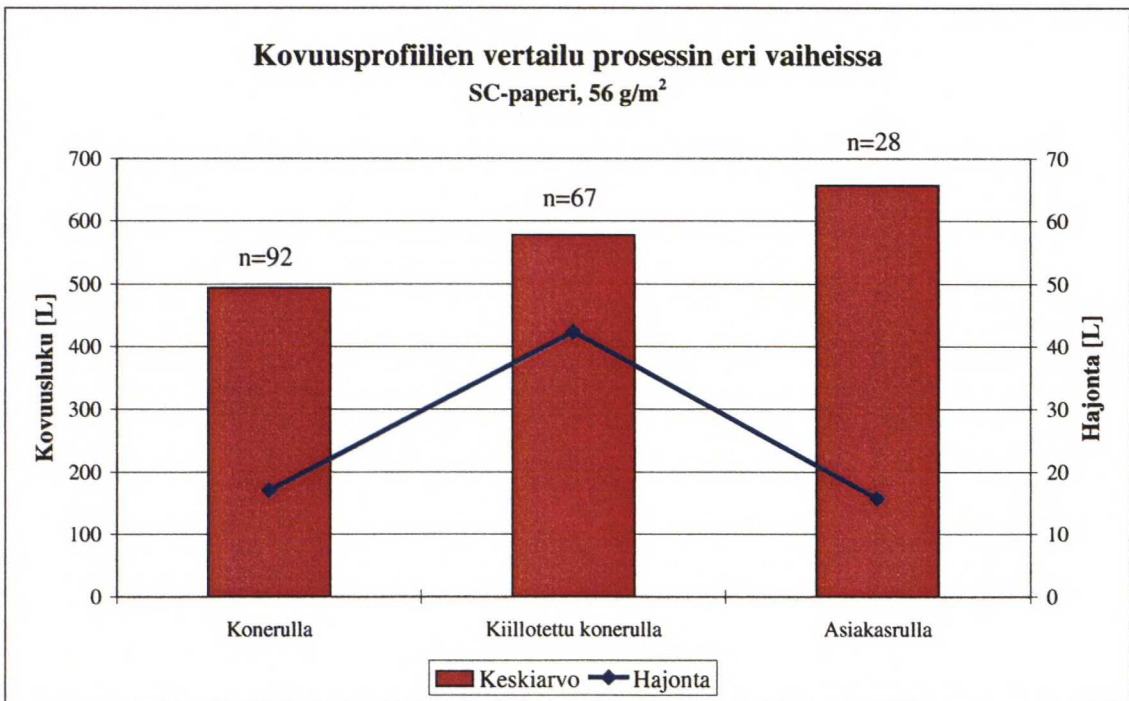
Kovuusmittauksia suoritettiin sekä konerullista että pituusleikatuista rullista. SC-koneella mittauksiin vaikutti jonkin verran mittausten menetelmän opettelu, sillä mittaukset

tehtiin käsin. Menetelmän soveltaminen vaatii muutaman käyttökerran, jotta mittaaja löytää oikean mittaustekniikan. Mittausmenetelmä osoittautui kuitenkin melko luotettavaksi ja tarkaksi. Lisäämällä toistojen määrää mittausten tarkkuus parani edelleen. Mittaus vaatii kuitenkin aikaa, eikä esimerkiksi esikokeissa useamman rinnakkaismäärittelyksen tekeminen ei ollut mahdollista tuotannollisista syistä.

SC-koneella tehtiin kovuusseuranta paperikoneelta leikkurille siten, että paperikoneella ja pituusleikkurin aukirullaimella mitattiin kovuusprofiilit koko konerullan leveydeltä. Lisäksi pituusleikkurilla kovuusprofiili mitattiin rullasta, joka valittiin jatkotutkimuksiin rullassa ilmenneen halkaisijavaihtelun vuoksi. Paperikoneella ja pituusleikatusta rullasta kovuudet mitattiin rullan pinnasta. Kiillotetusta konerullasta mittaus tehtiin ensimmäisen rullasta ajetun muuton jälkeen, jolloin otettiin myös pituusleikattu rulla jatkotutkimuksiin. Paperikoneella mittaväli oli 5 cm ja pituusleikkurin aukirullaimella 10 cm, paitsi valitun asiakasrullan kohdalla, jossa mittaväli oli 3 cm. Myös pituusleikattu rulla mitattiin mittavälillä 3 cm. LWC-koneella kovuusprofiili mitattiin kolmesta peräkkäisestä konerullasta mittavälin ollessa 10 cm. Konerullan etureunasta kovuusprofiili mitattiin uudestaan myös 5 cm:n mittavälillä. Tulokset olivat samansuuntaisia kuin harvemmalla mittavälillä, joten näitä mittauksia ei liitetty esikokeiden osalta tähän työhön, sillä mittavälillä 10 cm rullavanan kohta sattui osumaan suoraan mittauspisteen kohdalle. Tulokset on esitetty liitteessä 9.

Kovuusmittauksista saadut tulokset noudattivat melko hyvin aikaisempia mittaustuloksia. Sekä SC- että LWC-rullissa suuremman halkaisijan alue oli muita alueita kovempi ja SC-rullissa pienemmän halkaisijan alue oli puolestaan ympäristöään pehmeämpi. Pehmeimmässä SC-konerullassa ei ollut vielä havaittavissa suuria kovuusmuutoksia, mutta kiillotetussa konerullassa ja pituusleikatussa rullassa kovuuserot olivat selvempiä. Kiillotetun konerullan mittausta häirtäsi kiire, mikä näkyi myös profiilin muodossa, mutta kovuusmuutos pienemmän halkaisijan alueelta suuremman halkaisijan alueelle oli n. 60 L-kovuusyksikköä keskihajonnan ollessa 42 L. Pituusleikatussa rullassa kovuusmuutos oli likimain sama ja kovemman kohdan ero profiilin keskiarvoon oli n. 30 L keskihajonnan ollessa 16 L.

Vertailtaessa kovuusprofiilien keskiarvoja ja hajontoja (kuva 31) prosessin eri vaiheissa huomataan, että kovuusvaihtelut olivat selvimpiä leveällä, kiillotetulla konerullalla. Pituusleikkurilla oli kovuusvaihteluita lievästi tasoittava vaikutus. Tämä vahvistaa käsitystä ilmiöstä, joka on rullavanan esiintymisen yhteydessä melko yleinen. Käytännössä on huomattu, että halkaisijavaihtelut ovat yleisempiä nimenomaan leveillä syväpainorullilla, joiden halkaisija on suuri ja paperi on voimakkaasti kalanteroitu. Tämä johtuu osittain siitä, että leveillä rullilla radan saaminen tasoon on vaikeampaa, jos rullan leveydellä esiintyy voimakkaita kireysvaihteluita. Kun rata on leveä ja siinä esiintyy profiiliepätasaisuuksia, rainaan syntyy voimakkaita leikkausjännityksiä, jotka eivät pääse tasoittumaan ennen rullalle menoa. Lisäksi suuremman halkaisijan alueelta purkautuva, useimmiten pussimainen radan kohta on selvästi haitallinen, mikäli sen vierellä raina on normaalia kireämpi. Toisin sanoen leikkaamalla kapeampia rullia voidaan tasoittaa rullien kireysjakaumaa. Nykysuuntaus painotaloissa on kuitenkin täysin päinvastainen. Tekniikka vie kohti suurempia ja leveämpiä rullia, mikä lisää entisestään paineita hallita paperin kaikkia poikkiprofiileita entistä paremmin.



Kuva 31. Kovuusprofiilien vertailu paperikoneelta pituusleikkurille. Palkin yläpuolella on mittausten lukumäärä, josta keskiarvo on laskettu.

8.2.5 Lämpötila

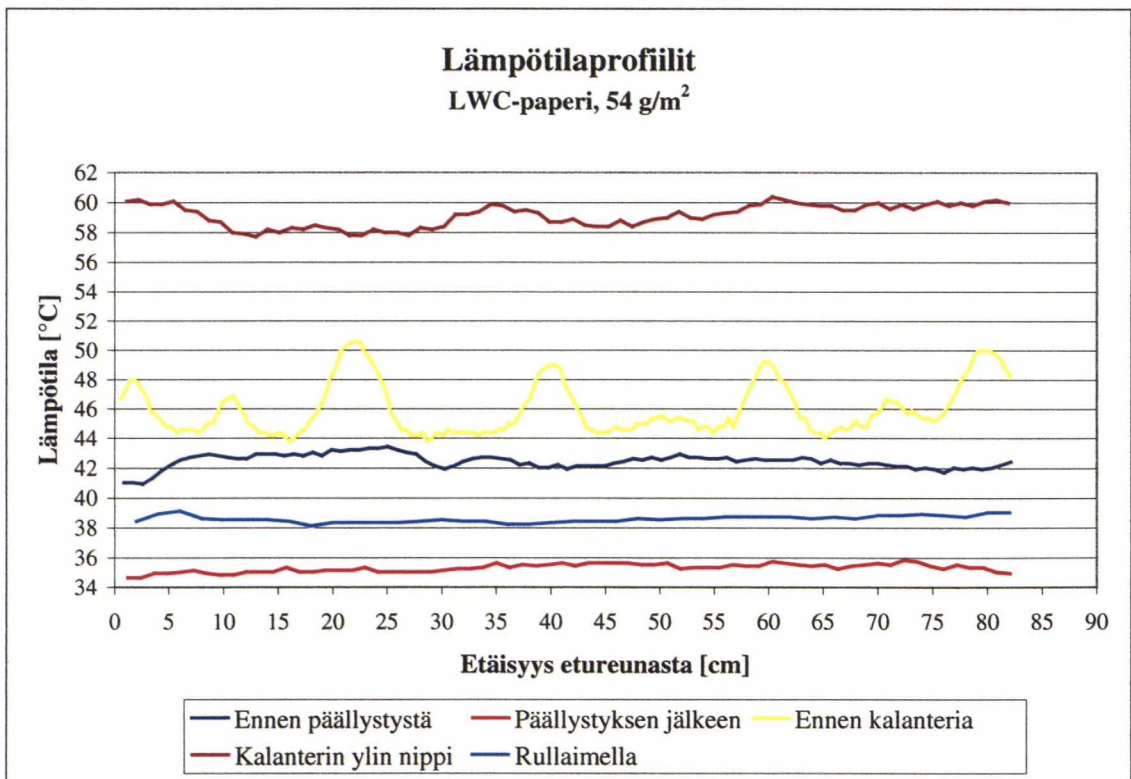
Lämpötilaprofiilin mittauksessa käytettiin apuna lämpökameraa, jolla saatiin liikkuvaa kuvaa rainasta ja koneen eri osista. LWC-linjalla lämpötilaprofiilin kehittymistä seurattiin kuivatusosan lopusta koneen kiinnirullaimelle. SC-linjalla seurattiin konerullan lämpötilaprofiilia koneen kiinnirullaimelta leikkurin aukirullaukseen. Ongelmia mittauksessa tuottivat lähinnä tilanpuute ja mittauspisteiden kohdistaminen, sillä kameralla otetun kuvan pohjalta ei pystytty tarkkaan kohdistamaan lämpötilaa tiettyyn radan kohtaan. Tämän lisäksi kohteista saadut kuvat oli muutamassa tapauksessa otettu liian kaukaa, minkä vuoksi mittaustarkkuus ei täysin vastannut työn vaatimuksia. Kameran perimmäinen käyttötarkoitus on löytää tutkittavassa kohteessa olevat tasoerot lämpötilassa, minkä vuoksi se on yleistynyt lähinnä tehtaiden kunnossapidon työkaluna.

Esikokeissa mukana olleella SC-koneella konerullan lämpötila käyttäytyi täysin poikkeavalla tavalla kuin mikään muu työn aikana kuvattu konerulla. Lämpötilaprofiili ei ollut missään vaiheessa stabiili, kuten muilla koneilla ja sen vuoksi profiilin luotettava määrittäminen oli käytännössä mahdotonta. Lämpötilaprofiilissa tapahtui sekä useamman asteen tasovaihtelua konesuunnassa että poikkisuunnan vaihtelua, joka näytti olevan luonteeltaan täysin satunnaista poikkisuunnan eri positioissa. Saattoi käydä jopa niin, että profiilissa ollut paikallisesti kuumempi kohta muuttui muutamassa sekunnissa kylmimmäksi kohdaksi. Varsinaista ilmiön aiheuttajaa ei ollut mahdollisuus lähteä tutkimaan, mutta konerullan ympäristö ei vaikuttanut profiilin epästabiilisuuteen. Kiillotuskalanterin kiinnirullaimella konerullan lämpötilaprofiili näytti stabiloituvan, mutta liian kaukaa otetuista kuvista ei voitu tehdä tarkkoja johtopäätöksiä lämpötilaprofiilin pohjalta. Pituusleikkurin kiinnirullaimella puolestaan lämpötilaprofiilin todettiin tasoittuneen jo niin paljon, että selviä poikkisuunnan vaihteluita ei ollut havaittavissa.

LWC-koneella lämpötilaprofiileita mitattiin useista eri väleistä ennen koneen kiinnirullainta (kuva 32). Eri vaiheiden profiileilla ei todettu juuri minkäänlaista yhdenmuotoisuutta keskenään, eikä myöskään kosteusprofiilissa ollut havaittavissa

merkittävää vaihtelua rullavanan kohdalla. Kuvassa 31 näkyy hyvin eri toimilaitteiden voimakas vaikutus lämpötilaprofiiliin. Ennen kiillotuskalanteria mitatussa lämpötilaprofiilissa näkyy hyvin infrojen vaikutus, samoin päällystyksen jälkeen näkyy hyvin päällystyksen lämpötilaprofiilia tasoittava vaikutus. Rullaimella ei lämpötilaprofiilin perusteella ole nähtävissä merkkiä rullavanan olemassaolosta, mutta kalanterin ylimmästä nipistä otetussa profiilissa on havaittavissa lievä kohouma lämpötilassa etäisyydellä 35 cm koneen etureunasta, mikä saattaisi olla merkki paikallisesti suuremmasta nippipaineesta. Tosin rullaimella kukin profiilipiste on laajemman alueen keskiarvo johtuen alhaisemmasta mittaustarkkuudesta.

Esikokeiden perusteella ei saatu selvää kuvaa lämpökameran soveltuvuudesta tämän tyyppiseen mittaustarkoitukseen. Mikäli profiili kuvataan riittävän kapeissa osissa, jolloin kohdistus saadaan toteutettua riittävän tarkasti, ja lämpötilaprofiili on stabiili, voidaan vasta tehdä luotettavia johtopäätöksiä lämpötilan yhteydestä stabiilin rullavanan suhteen.



Kuva 32. Lämpötilaprofiilit koneen etureunassa. Rullavana kohdassa 35 cm etureunasta.

8.2.6 Kapeiden rullien avulla tehtävät määritykset

Esikokeissa oli tarkoitus testata, voidaanko rullan dimensioita ja rakennetta tutkia tarkasti leikkaamalla pituusleikattu rulla kapeiksi kiekkoiksi. Tämän määrityksen avulla oli tarkoitus saada lisätietoa rullan halkaisijavaihteluiden syistä lähinnä rullassa esiintyvien plastisten venymien ja tiheysmittauksen kautta.

Kapeiden rullien leikkaukseen valittiin yksi rulla sekä SC- että LWC-koneelta. Rullat valittiin siitä positioista, jossa halkaisijavaihtelut olivat selvimpiä ja rullan koko oli senhetkisen asetteen mukainen. Molemmat rullat valittiin tarkastelun kohteena olleen konerullan toisesta muutosta pituusleikkurilla. Rullat pakattiin tehtaalla normaalia vahvemmin ja kuljetettiin leikattavaksi Bob-Paperi Ky:lle Muurameen. Yrityksellä on käytössään lähinnä kartongin leikkaukseen käytetty erikoismallinen leikkuri, jolla pystyy leikkaamaan kapeimmillaan 12 mm leveitä rullia. Koska tutkittava paperi oli ohutta ja sileää, pystyttiin rullasta leikkaamaan kapeimmillaan 3 cm leveitä ja halkaisijaltaan maksimissaan 50 cm suuruisia rullia. Käytännön ongelmien ja leikkauksen vaikeuden vuoksi tehtaalla pituusleikatuista rullista leikattiin kapeat kiekot vain referenssi- ja pattikohdasta. Referenssikohta valittiin rullasta visuaalisen tarkastelun ja tunnustelun perusteella mahdollisimman tasaisesta kohdasta. Kapeat kiekot leikattiin rullan pinnasta ja loppurulla käytettiin kireysprofiilin mittaukseen. Leikkauksen jälkeen kiekkojen dimensiot mitattiin ja lopuksi ne punnittiin. Kiekkojen irrottamisessa jouduttiin käyttämään melko suurta voimaa, mikä hankaloitti entisestään mittauksia ja vaikutti jonkin verran myös mittaustuloksiin. Yksityiskohtaiset mittaustulokset on esitetty liitteessä 10.

Taulukossa 5 on mittaustulosten pohjalta laskettu kapeiden rullien pituus rullalla olevan paperin, sen neliömassan ja rullan leveyden perusteella. SC-paperilla huomattiin leikkauksenvaiheessa, että rullassa ollut vana ei ollut riittävän stabiili, minkä vuoksi kapeaa kiekkoa ei pystytty leikkaamaan pelkästään suuremman halkaisijan alueelta. Tässä kiekossa alku on siis leikattu suuremman halkaisijan kohdalta, mutta loppua kohden tämä kohta muuttui pienemmän halkaisijan alueeksi. Syy tähän oli osittain siinä, että pituusleikattu rulla oli leikattu konerullasta, jota oli oskilloitu. Tämä näkyy myös

suhteellisessa pituuserossa referenssikohtaan verrattuna, sillä normaalisti suuremman halkaisijan alueella paperi on venynyt enemmän ja pienemmän halkaisijan alueella pituus on puolestaan referenssitasoa pienempi. Näin ollen tuloksen perusteella voisi olettaa, että pienemmän halkaisijan alueen siirtyminen kiekkoon vääristää tulosta. Tässä tapauksessa tulokseen vaikutti kuitenkin paljon enemmän mittausten epätarkkuus, mikä vei suurelta osin luotettavuuden koko menetelmältä.

Taulukko 5. Kapeiden kiekkojen laskennallinen pituus. SC-rullan kiekot leikattu kohdista 2828-2858 mm (patti/kuoppa) ja 2700-2730 mm (referenssi) koneen etureunasta. LWC-rullan kiekot leikattu kohdista 350-380 mm (patti) ja 220-250 mm (referenssi) koneen etureunasta.

SC-rulla	Patti/kuoppa	Virhe	Referenssi	Virhe	Ero, abs.	Ero, %	$\Delta\%$
Pituus [m]	4168	91	4202	80	-34	-0,81	$\pm 4,07$
Neliömassa [g/m²]	56,16	0,20	56,10	0,04	0,06	0,11	
Rullan paino [g]	7100	10	7150	10	-50	-0,70	
Hylsyn paino [g]	78	2	78	2	0	0	
Rullan leveys [m]	0,030	0,0005	0,030	0,0005	0	0	

LWC-rulla	Patti	Virhe	Referenssi	Virhe	Ero, abs.	Ero, %	$\Delta\%$
Pituus [m]	4173	79	4169	80	4	0,09	$\pm 3,83$
Neliömassa [g/m²]	55,21	0,03	55,58	0,05	-0,37	-0,67	
Rullan paino [g]	6990	10	7030	10	-40	-0,57	
Hylsyn paino [g]	78	2	78	2	0	0	
Rullan leveys [m]	0,030	0,0005	0,030	0,0005	0	0	

LWC-paperilla saatu suhteellinen pituusero 0,09 % pattikohdan ja referenssin välillä on suuruusluokaltaan lähellä kirjallisuudessa esiintyneitä venymäarvoja /73, 75/, joita lähinnä kalanteroinnissa syntyy, mutta SC:n tapauksessa havaittu vajaan prosentin ero on jo selvästi virheellinen. Koska sekä mittauksessa että laskennassa äärimmäisen pienillä eroilla ja referenssipisteen valinnalla on suuri vaikutus lopputulokseen, ei menetelmää voida tällaisenaan pitää käyttökelpoisena ja riittävän tarkkana. Tämän osoittaa myöskin kokonaisdifferentiaalil avulla laskettu virhemarginaali, joka on yli ± 3 %-yksikköä molemmissa tapauksissa. Etenkin kiekon leveyden ja neliömassan mittaustarkkuudella on virheen suuruuteen merkittävä vaikutus, mikä näkyy liitteestä

10. On myös huomattava, että laskennallinen pituus tarkoittaa paperin pituutta jännityksettömässä tilassa, kun taas leikkurin ilmoittama pituus on mitattu rullauksen yhteydessä, jolloin paperiin kohdistuu tietty sitä venyttävä voima. Tässä tapauksessa leikkurin ilmoittama pituus kapeille SC-rullille oli 4213 m ja LWC-rullille 4184 m. Molemmat mahtuvat laskennallisen pituuden virherajojen sisäpuolelle.

Kapeiden kiekkojen kautta laskettu neliömassa on selvästi lähempänä Tapio-analysaattorin suorakulmaisen anturin antamia arvoja kuin pyöreän anturin arvoja. LWC-paperilla tasoero (n. 0,2 g/m²) mitatun ja lasketun neliömassan välillä on samansuuruinen sekä patti- että referenssikohdassa (liite 10), mutta SC-paperilla pattikohdan laskennallinen neliömassa 55,56 g/m² eroaa selvimmin Tapio-analysaattorin neliömassasta 56,16 g/m² johtuen vanan epästabiilisuudesta (taulukko 6). Referenssikohdan laskennallinen neliömassa 55,95 g/m² on puolestaan hyvin lähellä Tapion arvoa 56,10 g/m² (liite 10). Erot johtuvat tässä tapauksessa lähinnä mittaustarkkuudesta, kohdistuksesta ja mittausantureiden kalibroinnista. Laskennallisen pituuden virhearviossa käytetty neliömassan virhe on 95 %-luottamusväli, joka on laskettu Tapio-analysaattorin mittaustuloksista.

Taulukko 6. Laskennallinen pituus ja neliömassa virhearvioineen.

<i>Rullavanan kohta</i>	<i>Laskettu</i>		<i>Mitattu LWC</i>
	<i>LWC</i>	<i>Virhe</i>	
Neliömassa [g/m ²]	55,07	1,03	55,21
Pituus [m]	4173	79	4184

<i>Rullavanan kohta</i>	<i>Laskettu</i>		<i>Mitattu SC</i>
	<i>SC</i>	<i>Virhe</i>	
Neliömassa [g/m ²]	55,56	1,03	56,16
Pituus [m]	4168	91	4213

Pituusprofiilin mittaus kapeiden rullien avulla osoittautui jo käytännön järjestelyiden osalta erittäin hankalaksi ja työlääksi menetelmäksi. Koska lähtöprofiileissa ei esiintynyt tarkastelun kannalta riittäviä profiilivaihteluita ja halkaisijavaihtelut olivat niin pieniä, että niitä ei enää havaittu kapeilla rullilla, ei rullan dimensioihin ja painoon perustuva analysointitapa ole käyttökelpoinen ja luotettava. Koska laskennallisesti määritettävä pituus on epätarkka, pitäisi kapeat rullat pystyä rullaamaan uudelleen siten,

että ne voitaisiin ensin rullata samalle tunnetulle kireydelle. Vasta tämän jälkeen voitaisiin verrata hieman suuremmalla tarkkuudella eri positioista leikattuja kapeita rullia toisiinsa ja laskenta voitaisiin suorittaa myös paperin paksuuden perusteella. Jotta puolestaan halkaisijaerot tulisivat rullissa esille, täytyisi profiilivirheiden olla suurempia. Tällöin pitäisi pystyä rullaamaan ohutta paperia suuremmalle halkaisijalle, mikä olisi olemassa olevilla laitteilla lähes mahdotonta. Kaiken lisäksi paperin rullalle saanti on entistä vaikeampaa, kun paperissa esiintyy voimakkaita profiilivaihteluita.

8.3 Johtopäätökset esikokeista

Esikokeilla saavutettiin osittain sille asetetut vaatimukset. Osa mittauksista näytti soveltuvan rullavan analysointiin hyvin, mutta osa mittauksista joko epäonnistui tai jäi kokemattomuuden ja epätietoisuuden vuoksi osittain hyödyntämättä. Esikokeiden perusteella riittävän erottelukyvyn ja tarkkuuden rullavan analysointiin näyttivät omaavan raina-analysointori sekä kovuus- ja kireysmittaus. Osittain epäselväksi jäi ultraäänellä tehtävän lujuusmittauksen ja lämpökameran soveltuvuus tämäntyyppisen ongelman havaitsemiseen. Näiden lisäksi kapeiden rullien avulla tehtävät määritykset eivät nykyisellään sovellu rullavan kvantitatiiviseen analysointiin. Menetelmistä on yhteenveto taulukossa 7.

Näiden johtopäätösten pohjalta tutkimuksia päätettiin jatkaa parhaiten soveltuvien ja epäselväksi jääneitä mittausten menetelmiä soveltaen. Koska pituusprofiilin määrittämisessä ei saatu luotettavia tuloksia, päätettiin tueksi ottaa osarainojen perusteella tehtävä pituusmittaus. Tämän lisäksi seuraavassa vaiheessa oli tarkoitus selvittää valittujen poikkiprofiilin pisteiden kokoonpuristuvuus ja z-suuntainen kimmokerroin kalanteroimattomasta ja kalanteroidusta SC-paperista.

Taulukko 7. Yhteenveto käytetyistä mittauksista.

Käytetty menetelmä	Käytetään/hylätään	Perustelut
Tapio-analysaattori	käytetään	Riittävän tarkka ja monipuolinen rullavanan analysoinnissa.
L&W TSO	käytetään	Laitteen käyttökelpoisuus jäi osittain epäselväksi. Päätettiin kokeilla uudestaan.
IQTension™ - kireysmittauspalkki	käytetään	Riittävän tarkka kireyserojen esille saamiseksi.
PAROtester2	käytetään	Hyvä erottelukyky rullan kovuusvaihteluiden havaitsemisessa.
Lämpökamera	käytetään	Havainnollinen, mutta osittain epätarkka kohdistus vaatii kehittämistä.
Kiekoiksi leikkaus	hylätään	Liian epätarkka.

9 TUTKIMUSTEN SUORITUS

9.1 Koesuunnitelma

Tässä osiossa käydään läpi varsinaisia tutkimuksia, joita tehtiin sekä tehdas-, laboratorio- että pilot-mittakaavassa. Rullavanan ja tasaisen rullan pinnan vertailemista varten otettiin tehtaalta profiilimittaustuloksia, rullia erilaisiin jatkotutkimuksiin, sekä kaikista vaiheista näytteitä laboratoriotutkimuksiin. Näytteiden valinnassa jouduttiin tyytymään koneelta saataviin näytteisiin, sillä hallittua vanaa ei päästy tekemään tuotantokoneelle eikä käytettävissä olleen ajan puitteissa myöskään pilot-koneelle. Tilastollisen koesuunnitelman soveltamista ei katsottu järkeväksi tässä tapauksessa ongelman luonteen vuoksi. Tutkimuksissa keskityttiin yhden nimenomaisen vanan huolellisempaan tarkasteluun.

Koesuunnitelma, jonka pääkohdat tässä esitetään, sovitettiin käytettävissä olleiden resurssien puitteisiin. Tavoitteena oli perehtyä mittausten menetelmiin, jotka voisivat olla käyttökelpoisia konerullan halkaisijavaihteluita aiheuttavan rullavanan havaitsemisessa. Mittaukset sisälsivät tehdas-, pilot- ja laboratoriokokeita. Tuotantolinjalla, josta näytteitä kerättiin, konerulla siirrettiin suoraan kiillotuskalanterille ja sieltä edelleen pituusleikkurille ilman muita käsittelyvaiheita.

Kovuusprofiilit mitattiin tehtaalla kiillottamattoman ja kiillotetun SC-paperin konerullasta sekä pituusleikatusta rullasta. Lämpökameralla kuvattiin konerullan lämpötilaprofiilia sekä paperikoneella että kiillotuskalanterin kiinnirullaimella. Tämän lisäksi koneelta kerättiin profiilitietoja tuotannon aikana pilot- ja laboratoriomittausten tueksi ja rullavana-aluetta kuvattiin digitaalikameralla.

Tapio-analyysiä sekä vetojäykkyysmittauksia varten otettiin 30 poikkiratanäytettä samasta kiillottamattomasta ja kiillotetusta konerullasta. Tämän lisäksi kokoonpuristumismittauksia varten otettiin 75 arkkia. Näytteet pakattiin tehtaalla mustiin muovisäkkeihin ja toimitettiin mitattaviksi. Pituusleikkurilla samasta konerullasta otettiin kireys- ja pituusprofiilin mittausta varten rullavanan kohdalta

leikattu rulla, joka kavennettiin tehtaalla leveyteen 55 cm ja kuljetettiin pakattuna Järvenpään Metso Paper Oy:lle.

9.2 Tehdastutkimukset

9.2.1 Kovuusmittaukset

Kovuusmittaukset suoritettiin konerullasta mittavälillä 3 cm ja pituusleikatusta rullasta mittavälillä 1 cm. Koska mittalaitteen muistiin ei mahtunut kuin 100 mittausta kerrallaan, mitattiin konerulla useammassa osassa. Jokaisessa mittaustilanteessa rullan pinta pidettiin kireänä, jotta sen löystyminen ei olisi haitannut mittausta.

9.2.2 Lämpötilaprofiilin mittaus konerullasta

Lämpötilaprofiilit mitattiin tehtaan omalla lämpökameralla koneen kiinnirullaimella ja kiillotuskalanterilla. Mittausta varten tehtiin metrin pituinen mittatikku ohuesta metalliputkesta, johon merkittiin 10 cm:n mitta-asteikko mustalla teipillä. Mitta-asteikkoa käytettiin varmistamaan lämpötilaprofiilin riittävän tarkka kohdistus lämpökuvien pohjalta. Kuvatessa kamera pidettiin kiinteällä jalustalla, mikä helpotti kuvien ottamista ja etäisyys rullaan säilyi likimain vakiona. Ennen kuvien ottamista pyörivää konerullaa seurattiin hetken lämpökameralla, jotta voitiin todeta lämpötilaprofiilin stabiilisuus. Koska profiili näytti kameran kuvan perusteella hyvin stabiililta, oletettiin senhetkisen tilanteen edustavan koko konerullan lämpötilan keskiarvoprofiilia.

Koneen kiinnirullaimella konerulla kuvattiin yhdeksässä osassa niin, että jokaisessa kuvassa rulla näkyi noin 2,5 m leveydeltä. Näin saatiin yksi kuva-alkio vastaamaan noin 10 mm leveän alueen keskiarvoa lämpötilaprofiilissa, kun kuvan informaatio tallentui yhteensä 256 kuva-alkiolle. Tällä mittavälillä lämpötilaprofiili voitiin määrittellä riittävän tarkasti. Tämän lisäksi sekä koneella että kiillotuskalanterilla konerulla kuvattiin kahdessa osassa ja erikseen rullavanan kohdalta. Kuvauksen jälkeen kuvat siirrettiin tietokoneelle ja kuvia käsiteltiin kameran mukana tulleen ohjelmiston avulla.

Ohjelmiston avulla kuvista voitiin siirtää lämpötilatiedot numeerisena taulukkolaskentaohjelmaan. Kohdistus tapahtui siten, että kuvasta mittatikun mukaisen asteikon matkalta saadut lämpötila-arvot jaettiin tasan oletetulle metrin leveydelle. Kameran asetuksissa käytettiin paperin emissiviteetille taulukkoarvoa 0,96.

9.3 Laboratorio- ja pilot-tutkimukset

9.3.1 Tapio-analysaattori

Tapio-analyysi poikkiratanäytteillä suoritettiin laitevalmistajan suositusten mukaisesti 20 arkista. Alkuperäinen suunnitelma oli tehdä mittaukset 30 arkista, jotta paksuusmittauksen tilastollinen luotettavuus olisi noussut, mutta näyteruuhkan vuoksi arkkien määrää rajoitettiin. Paperista mitattiin neliömassa kahdella anturilla (pyöreä ja suorakulmainen), paksuus, kiilto, transmissio ja tuhka.

Analyysiä varten poikkiratanäytteet kavennettiin leveyteen 25 cm ja niistä muodostettiin yksi yhtenäinen nauha teippaamalla näytteet päistään kiinni toisiinsa. Nauha kelattiin hylsulle ja tämän jälkeen hylsillä oleva paperi ajettiin analysaattorin läpi tietyllä vakionopeudella ja -kireydellä. Analyysilaitteisto tunnisti eri poikkiratanäytteet teipin perusteella. Lisäksi reunoista poistettiin 6 mittauspistettä molemmista päistä. Koska tarkkaa mittauksen aloituskohtaa ei saatu selville, pääteltiin mittaustulosten ja todellisen ratalevyden perusteella, että poikkiratanäytteiden molemmista reunoista jätettiin mittaamatta noin 3 cm:n levyinen alue.

Mittaukset suoritettiin esikokeiden tapaan analysaattorin vakioasetuksilla. Mittaväli oli 3,2 mm ja alipäästösuodatus taajuudella 23,5 Hz. Koska rullavanat olivat leveydeltään noin 6 cm, oli näiden asetusten käyttö analyysissä riittävä. Mikäli vanat olisivat olleet kapeampia, olisi analysaattorin suodatustaajuutta voitu muuttaa, mutta esimerkiksi alle 1 cm:n vaihteluiden (alipäästösuodatus 100 Hz) esittäminen kuvaajissa ei olisi kuvien havainnollisuuden kannalta enää mielekäästä.

Näytteiden valmistelu tapahtui tilassa, jossa ei ollut standardin SCAN P 2:75 mukaisia olosuhteita, mutta itse analysointi tapahtui vakioilmastoidussa huoneessa, jossa näytteiden annettiin olla ennen mittausta. Mittausmenetelmistä kiilto oli standardin TAPPI T480 mukainen (Hunter-kiilto). Muut menetelmät ovat laitetta varten kehitettyjä. Mittaustuloksista laskettiin keskiarvoprofiilit ja samalla suoritettiin myös varianssikomponenttianalyysi analysaattorin yhteyteen asennetulla tietokoneella. Tämän lisäksi muutamista mitatuista ominaisuuksista piirrettiin jyrkkyysprofiilit kaavaa (1) soveltaen.

9.3.2 Vetojäykkyyden (TSI) ja sen orientaatiokulman (TSO) määrittäminen ultraäänen avulla

Paperin lujuusominaisuudet määritettiin Lorenzen & Wettre TSO –mittalaitteella, koska se oli ainoa saatavilla oleva laite, jolla voitiin määrittää melko nopeasti ja tiheällä mittavälillä paperin lujuusominaisuudet sekä kone- että poikkisuunnassa. Määritykset tehtiin samanlaisista poikkiratanäytteistä, jotka oli otettu Tapio-analyysiä varten. Näin saatiin samalla koko profiilin muoto selville. Näiden mittausten tarkoituksena oli tutkia, voidaanko rullavanat havaita paperi lujuusominaisuuksien perusteella.

Mittaus perustuu ultraäänen etenemisnopeuteen paperissa, mihin liittyvää teoriaa on käyty läpi tarkemmin liitteessä 2. Vetojäykkyyksindeksillä tarkoitetaan käytännössä paperin kimmokertoimen ja sen tiheyden suhdetta. Tästä termistä käytetään myös nimitystä vetoindeksi.

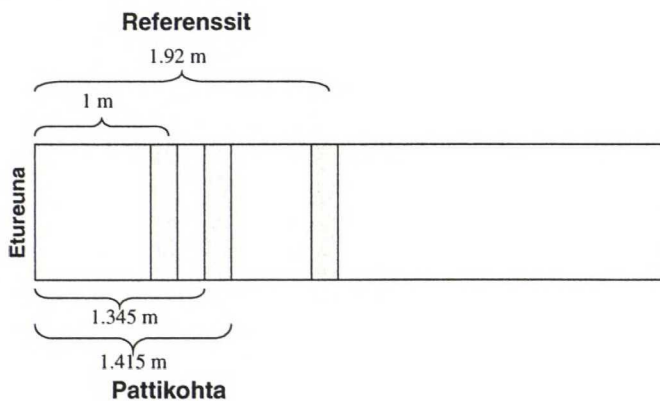
Vetojäykkyyksindeksi ja sen orientaatiokulma mitattiin kolmesta poikkiratanäytteestä sekä kalanteroimattomasta että kalanteroidusta paperista. Kokonaiset profiilit mitattiin mittavälillä 50 mm ja rullavanan kohdalta mittaus suoritettiin erikseen valitulta metrin matkalta mittavälillä 10 mm. Koska laitteella voidaan mitata kerrallaan 400 mittapistettä, rajoittaa se leveiden näytteiden mittaamista tiheällä mittavälillä. Mittausten perusteella laskettiin keskiarvoprofiilit vetojäykkyyksindeksille kone- ja poikkisuunnassa, vetojäykkyyksindeksien suhde sekä suuntakulma, joka on vetojäykkyyden maksimiorientaatiosuunnan ja konesuunnan välinen kulma. TSO-

mittarin antamat vetojäykkyyksindeksit korjattiin Tapio-analysaattorin neliömassa-mittausten perusteella, sillä TSO-mittari käyttää tulosten laskennassa samaa ennalta syötettyä neliömassa-arvoa poikkiprofiilin jokaiselle pisteelle.

9.3.3 Kokoonpuristuvuus

Kokoonpuristuvuusmääritykset tehtiin KCL:ssa kehitetyllä KCL-PURRE –mittalaitteella, jolla voitiin tutkia paperin käyttäytymistä puristuspuheen funktiona. Laitteisto koostui puristuskennosta, painepumpusta ja kennoon liitetystä mittaustietokoneesta. Laitteen tarkempi kuvaus löytyy liitteestä 3.

Mittausta varten kiillottamattomasta ja kiillotetusta konerullasta otettiin 75 poikkirata-arkkia kohdasta, jossa rullavanaa ilmeni. Arkit pakattiin mustaan muovipussiin, josta ne mittausta paikalla otettiin ilmastoitumaan vuorokaudeksi. Papereista leikattiin näytteet pattikohdasta (1.345 m – 1.415 m etureunasta) sekä kahdesta referenssikohdasta (1 m ja 1.92 m etureunasta) kuvan 33 mukaisesti. Referenssit pyrittiin valitsemaan mahdollisimman tasaisista kohdista, joissa ei ilmennyt rullavanaa ja niitä otettiin kaksi, jotta voitiin luotettavammin selvittää mahdollinen ero pattikohdan ja rullan tasaisen pinnan välillä. Referenssit leikattiin siten, että näytteen keskikohta oli ilmoitetun mitan päässä paperin etureunasta. Pattikohta leikattiin ilmoitettujen mittojen väliltä. Leikattujen näytteiden koko oli 7 cm * 10 cm ja varsinainen puristettava ala oli 5,5 cm * 5,5 cm.



Kuva 33. Näytteiden leikkauskohdat kokoonpuristumismittauksia varten.

Arkit puristettiin 10 arkin pinoissa ja kustakin koepisteestä mitattiin viisi rinnakkaismääritystä. Alkuperäinen tavoite oli puristaa huomattavasti suurempaa pinoa, mutta laitteeseen ei ennakkotiedoista poiketen mahtunut enempää arkkeja. Kalanteroimattomille näytteille tehtiin viisi peräkkäistä puristusta, jolloin voitiin suurimmaksi osaksi eliminoida paperin pinnan karheuden vaikutus mittaustuloksiin ja samalla pystyttiin tutkimaan paperin elastista muodonmuutosta etenkin paperin z-suunnassa. Näiden puristusten välinen aika pidettiin mahdollisimman lyhyenä, jotta paperi ei olisi ehtinyt palautua. Kalanteroituja näytteitä puristettiin vain yhden kerran, koska eri koepisteiden kokoonpuristumisen oletettiin aikaisemman tutkimuksen mukaan olevan tiheällä paperilla lähes muuttumaton peräkkäisillä puristuskerroilla /55/.

Mittauksessa paperipinon paksuus mitattiin kahdella LVDT-etäisyysanturilla paineen funktiona. Sekä etäisyys- että paineanturin mittaustulokset kerättiin tietokoneelle sekunnin välein puristusajan ollessa alle 120 sekuntia ja tämän jälkeen minuutin välein. Korkein käytetty paine oli 100 bar ja paineen nostaminen tuohon paineeseen kesti yhteensä 90 sekuntia. Kokoonpuristuvuus laskettiin paperipinon paksuuden avulla ja tulosten sovituksessa käytettiin Pfeifferin mallia (kaavat 3 ja 4).

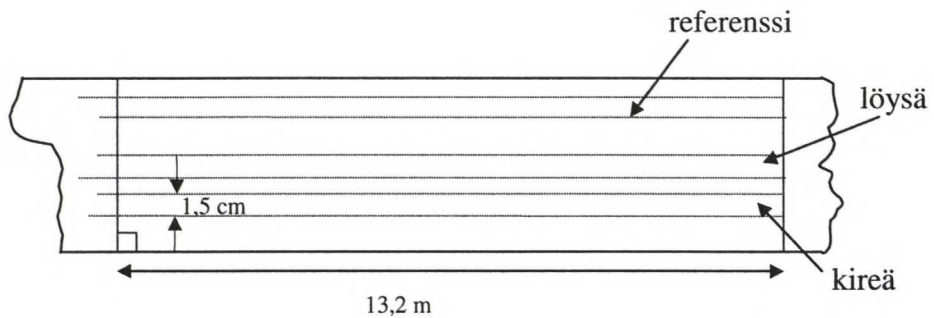
9.3.4 Rainan leikkaus osarainoihin

Koska esikokeissa ei onnistuttu kapeiden rullien avulla määrittämään luotettavasti pituuseroja poikkisuunnan eri kohtien välillä, päätettiin seuraavassa tutkimusvaiheessa mitata rainassa esiintyviä pituuseroja osarainojen avulla. Menetelmä on yksinkertainen ja työläs. Se on kuitenkin herkkä pituuserojen havaitsemisessa, mikäli mitattava liuska on riittävän pitkä ja pituuden mittauksessa käytetyn laitteen resoluutio on suuri. Tässä tapauksessa rainaa ei jaettu osarainoihin sen koko leveydeltä, vaan mittaus suoritettiin kolmesta kohtaa. Kohdat valittiin siten, että yksi liuska leikattiin rullan tasaisen pinnan kohdalta, kaksi suuremman halkaisijan kohdalta ja yksi pienemmän halkaisijan kohdalta kalanteroidusta paperista. Rullan tasaisen pinnan kohdalta leikatun osarainan pituutta pidettiin laskennassa referenssipituutena. Ensimmäisessä mittauksessa pituusleikatusta rullasta otettiin noin 4 m pitkä näyte rullan pinnasta, mutta näytepala oli liian lyhyt,

jotta pituuserot olisivat tulleet selvästi esille. Seuraavaksi otettiin noin 13 m pitkä näyte, joka oli riittävän pitkä erojen esille saamiseksi.

Ennen osarainojen leikkausta näytteen päihin vedettiin suorat viivat siten, että ne muodostivat suorakulman rainan leikatun reunan kanssa kuvan 34 mukaisesti. Tämän jälkeen rajattiin konesuuntaisilla viivoilla kohdat, jotka oli valittu mitattaviksi ja leikkaus suoritettiin viivoja pitkin kahdella paperiveitsellä. Aluksi rainasta leikattiin 3 cm leveät osarainat, mutta mittausvaiheessa liuskoja kavennettiin leveyteen 1,5 cm, jotta pituus aivan vanan keskellä saatiin mitattua. Pituuserot 3 cm leveiden osarainojen välillä olivat 1-2 mm. Konesuuntaisen näytepalan ollessa vapaana leikepöydällä, sen päihin piirrettyjen poikkisuuntaisten viivojen välinen pituus oli likimain sama kuin rainasta leikatun kireän kohdan pituus.

Leikkauksen jälkeen osarainat asetettiin leikepöydälle ja niiden toiseen päähän laitettiin paino, jotta ne pysyivät mittauksen ajan paikallaan. Osarainojen toinen pää pidettiin vapaana. Mittaus suoritettiin millimetriviivaimella siten, että näyte pakotettiin samalla tasoon painamalla sitä kevyesti ylhäältäpäin. Tuloksista laskettiin absoluuttinen ja suhteellinen pituusero referenssikohtaan verrattuna.



Kuva 34. Osarainojen leikkaus.

9.3.5 Kireysprofiilin mittaus

Rainan kireysprofiilin mittaus tapahtui Metso Paper Järvenpään tutkimuslaitoksella. Tehtaalla rullavanaisesta konerullasta otettiin pituusleikattu rulla siitä kohdasta, jossa pahin profiilivirhe ilmeni ja rulla kavennettiin tehtaalla leveyteen 55 cm. Tämä rulla ja kaksi aikaisemmin rullavanan takia hyllytettyä rullaa pakattiin tehtaalla tiiviisti mahdollisten kosteusvaihteluiden varalta ja kuljetettiin Järvenpäähän.

Järvenpäässä rullien suojakääreet avattiin ja rullat ehtivät olla noin kolme tuntia tutkimushallissa ennen niiden aukirullausta. Rullia oli siis yhteensä kolme ja ne ajettiin tutkimuslaitoksen pilot-monitelakalanterin yhteyteen asennetun kireysmittauspalkin kautta. Rata kuljetettiin kalanterin telaston ohi ja tuotiin kireysmittauspalkin kautta kalanterin kiinnirullaimelle. Kaikista rullista mitattiin kireysprofiili siten, että aluksi rullasta ajettiin noin 5 cm pois ja varsinainen laskentaan mukaan otettavien tietojen keruu aloitettiin tämän jälkeen. Mittausten aikana nopeus pidettiin koko ajan vakiona (500 m/min) ja kaikki rullat ajettiin kolmella eri kireystasolla (350 N/m, 400 N/m ja 450 N/m). Kireystason nosto tehtiin askeleittain alemmasta kireydestä suurempaan ja jokaisella kireystasolla rullan halkaisijasta ajettiin useampi senttimetri. Rullien lähtöhalkaisija oli 850 mm ja ne oli ajettu tehtaalla ratakireydellä 400 N/m. Kireystason noston tarkoituksena oli mitata rainan pituus- ja kimmokerroinprofiili kireyden ja vetoeron perusteella /80/. Koska kyse on hyvin pienistä nopeuseroista auki- ja kiinnirullauksen välillä, ei koneen oma nopeusmittaus ollut riittävän tarkka. Nopeusmittaus oli tarkoitus suorittaa lasermittauksella, mutta mittalaite oli epäkunnossa eikä sitä saatu mittausten aikana kuntoon.

Kireysmittauspalkissa oli mitta-aukot 1 cm:n välein poikkisuunnassa ja järjestelmä keräsi kireysprofiilitiedot palkilta sekunnin välein 55 cm:n leveydeltä. Mittausarvot kerättiin tietokoneelle, jossa niitä käsiteltiin taulukkolaskentaohjelmalla. Mittauksista laskettiin profiilikeskiarvot eri kireystasoilla ja vertailtiin kireystason muutosta löysän ja kireän kohdan välillä. Mittauksissa yksi rullista käännettiin pilot-laitteen rakenteellisen vaikutuksen selvittämiseksi.

10 TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

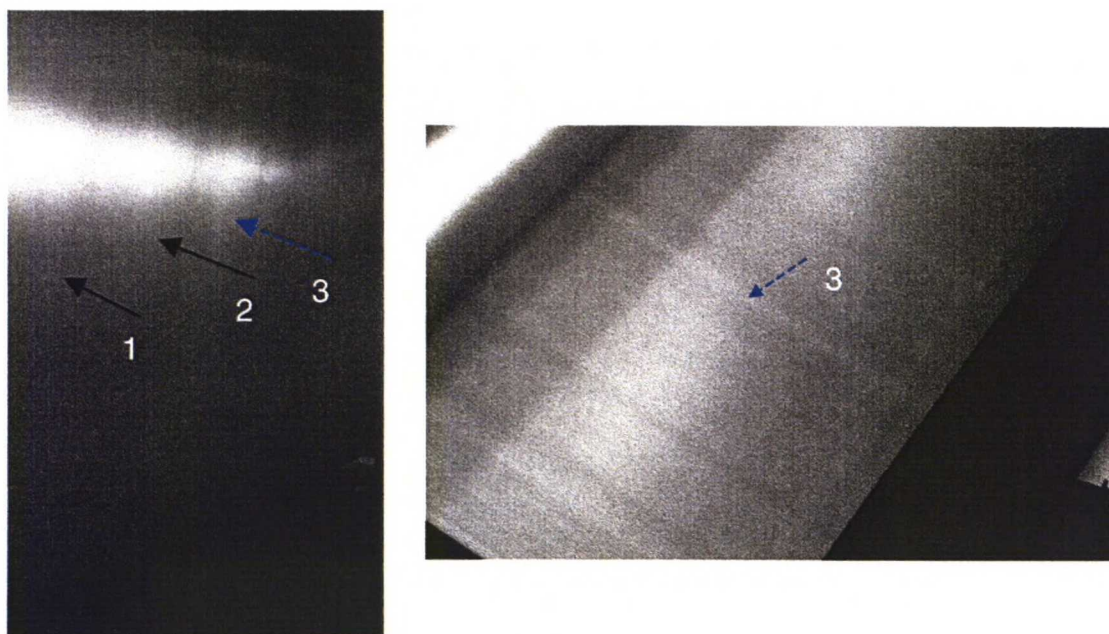
10.1 Tapio-analyysit

Tapio-analysaattorin mittaustuloksia löytyy liitteestä 11. Mittauksia on analysoitu sekä koko profiilin leveydeltä että rullavanan kohdasta. Tulosten tulkinnan helpottamiseksi taulukossa 7 on selvitetty kiillottamattomassa ja kiillotetussa konerullassa olleiden vanojen sijainti koneen etureunasta mitattuna. Taulukossa olevia nimityksiä käytetään läpi kokeellisen osan. Koneella vanojen leveydet olivat noin 5 cm ja kalanterilla noin 6 cm. Konerullassa oli näiden lisäksi muita pienempiä halkaisijaheittoja havaittavissa, mutta työmäärän ja tarkastelun mielekkyyden kannalta oli syytä keskittyä alueeseen, jossa rullavana oli selvimmin näkyvissä. Erot huippujen sijainnissa kiillottamattoman ja kiillotetun konerullan välillä johtuu kalanteroinnin rataa levittävästä efektistä. Mittausten mukaan 8419 mm leveä rata levisi 46 mm. Lisäksi tulosten tulkinnan yhteydessä kiillottamattomasta paperista käytetään nimitystä konepaperi ja kiillotetusta paperista nimitystä SC-paperi.

Taulukko 8. Rullavanojen sijainti kiillottamattomassa ja kiillotetussa konerullassa koneen etureunasta mitattuna. Vanojen leveydet olivat 50-60 mm. Näistä patti 2 otettiin tarkemman tutkimuksen kohteeksi.

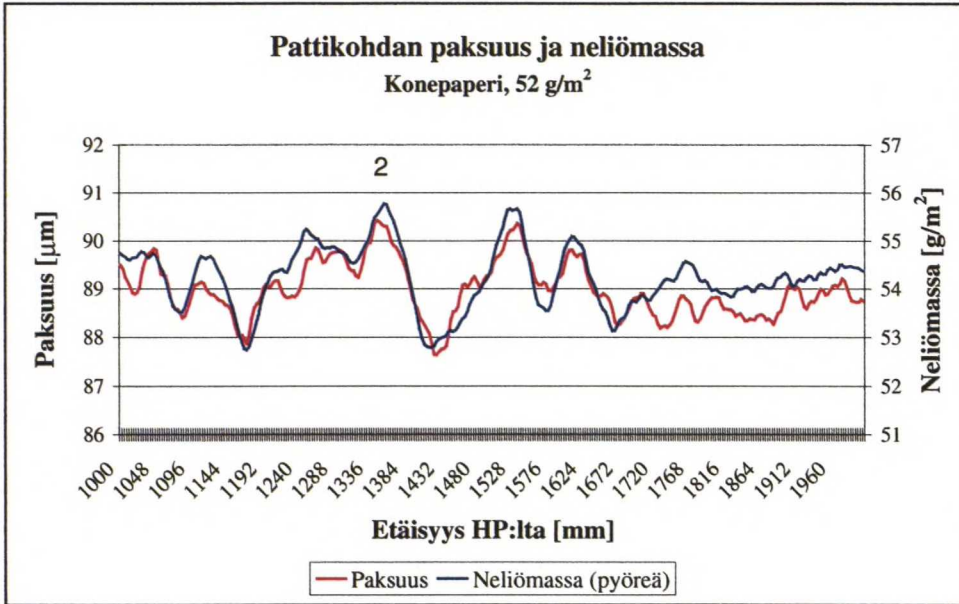
	Patti 1	Patti 2	Patti 3	Kuoppa 1	Kuoppa 2
Kalanteroimaton					
Huippu [mm]	1245	1345	1530	1320	1420
Kalanteroitu					
Huippu [mm]	1260	1380	1500	1320	1440

Kuvassa 35 näkyy kuva SC-rullan kyljestä. Kuten kuvasta nähdään, halkaisijavaihtelut eivät ole kovin suuria, mutta näkyivät selvästi etenkin vinovalaistuksessa. Tässä tapauksessa kiillotuskalanterin kiinnirullainta on oskilloitu $\pm 1,5$ cm, mikä olennaisesti on tasoittanut vanaa. Liitteessä 12 on useampia kuvia vanasta. Konerullasta halkaisijavaihteluita ei voitu erottaa, koska rullaussylinterin rullan pintaan jättämä jälki oli niin voimakas.

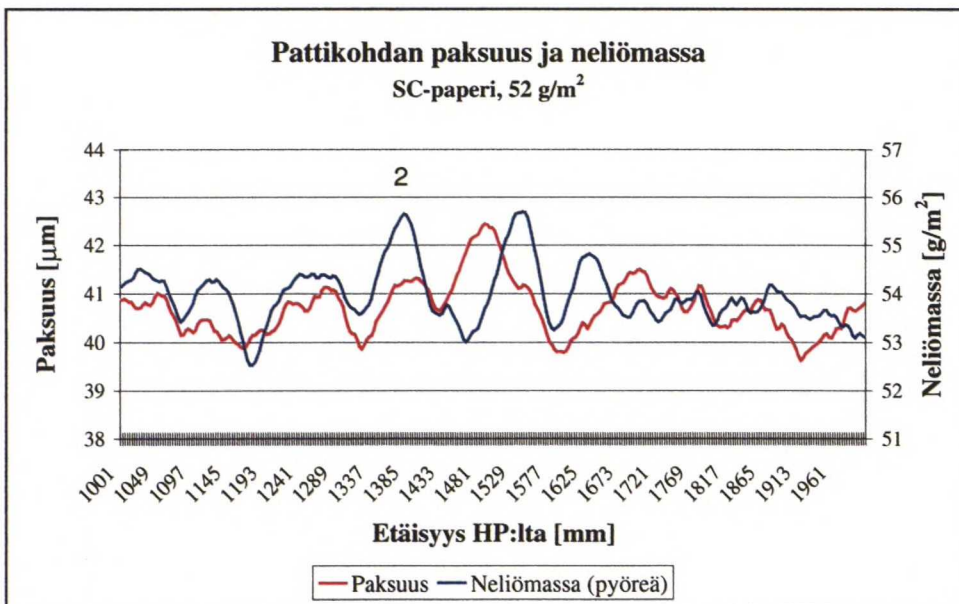


Kuva 35. Rullavana SC-rullan pinnassa ja ennen kalanterin kiinnirullainta. Yksi vanoista erottui myös ennen kalanterin kiinnirullainta vaaleana juovana paperissa (patti 3). Kuvassa nuolet osoittavat suurempien halkaisijoiden kohtia. Näistä keskimmäinen (patti 2) otettiin tarkemman tarkastelun kohteeksi.

Kuvissa 36a ja 36b on esitetty rullavanojen alueelta mitatut paksuus- ja neliömassaprofiilit. Näistä profiileista käyvät hyvin ilmi voimakkaat paikalliset muutokset, jotka osaltaan vaikuttavat vanan syntyyn. Vertailemalla mitattuja profiileita kuvassa 35 näkyvään rullan pintaan, voidaan todeta, että suurempien halkaisijoiden alueet korostuvat niiden välissä olevien pienempien halkaisijoiden alueiden vuoksi. Esimerkiksi patti 2 (taulukko 8) näytti erottuvan selvimmin rullan pinnasta, mutta kuvassa 36b tämä ei erotu paksuusprofiilista enää yhtä selvänä. Näiden tulosten ja myöhempien mittausten perusteella voitiin todeta, että tämä kohta on kalanteroitunut muita enemmän johtuen tiheysvaihteluiden paikalliseen kasvuun.



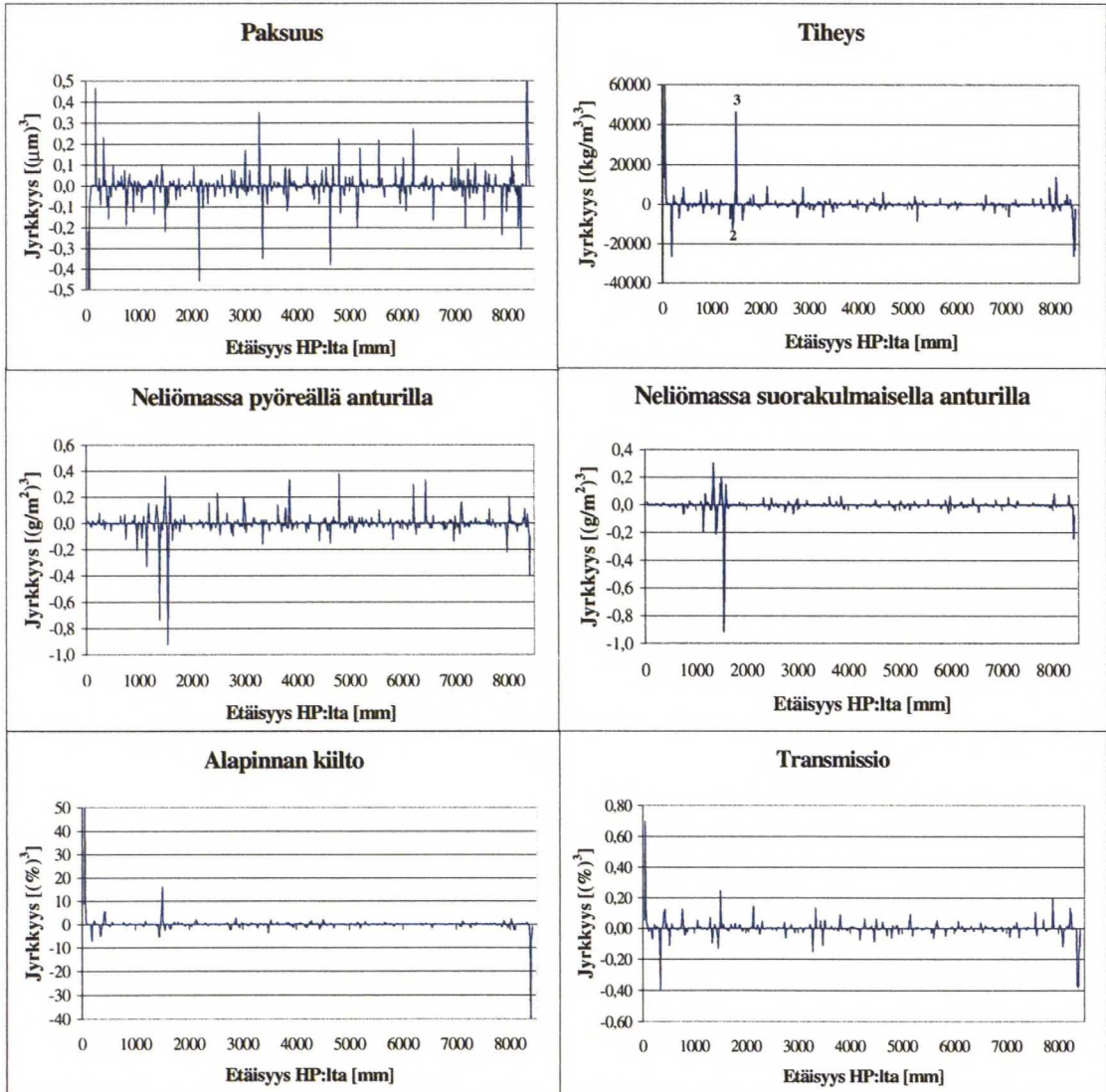
a)



b)

Kuva 36. a) Paksuus- ja neliömassaprofiili ennen kalanterointia. b) Paksuus- ja neliömassaprofiili kalanteroinnin jälkeen. Kuvissa on esitetty pyöreällä neliömassa-anturilla ($d = 5 \text{ mm}$) mitattu profiilin osa, sekä patin 2 paikka. HP = koneen hoitopuoli eli etureuna.

paksuusprofiilien perusteella voidaan sanoa, että huiput ovat muodostuneet lämpötilapiikin reunoille ja näiden välissä olevan kuopan 2 paksuus on säilynyt paremmin ympäristöön verrattuna (liite 11).



Kuva 37. Jyrkkyyksprofiilit tärkeimmistä Tapio-analysaattorilla mitatuista kiillotetun paperin ominaisuuksista väliltä 40 – 8428 mm. Patit 2 ja 3 on merkitty tiheyden jyrkkyyksprofiiliin.

Liitteessä 11 on laskettu korrelaatiot eri profiilien kesken. Korrelaatioiden perusteella voidaan valmiista SC-paperista todeta kalanteroinnin paperia muokkaava vaikutus, sillä paksuuden ja neliömassan välillä on vain heikko positiivinen korrelaatio (n. 0,3). Sitä

vastoin laitteessa käytetyn punaisen valon transmission ja paksuuden välillä on voimakas negatiivinen korrelaatio sekä koko profiilin että rullavanan kohdalla (-0,95). Tämä on selvästi merkitsevämpi kuin paksuuden ja kiillon välinen korrelaatio, mitä ennakolta pidettiin parhaana mittaus-menetelmänä paksuuden ennustamisessa ko. koneella.

10.2 Paperin kosteus ja lämpötila

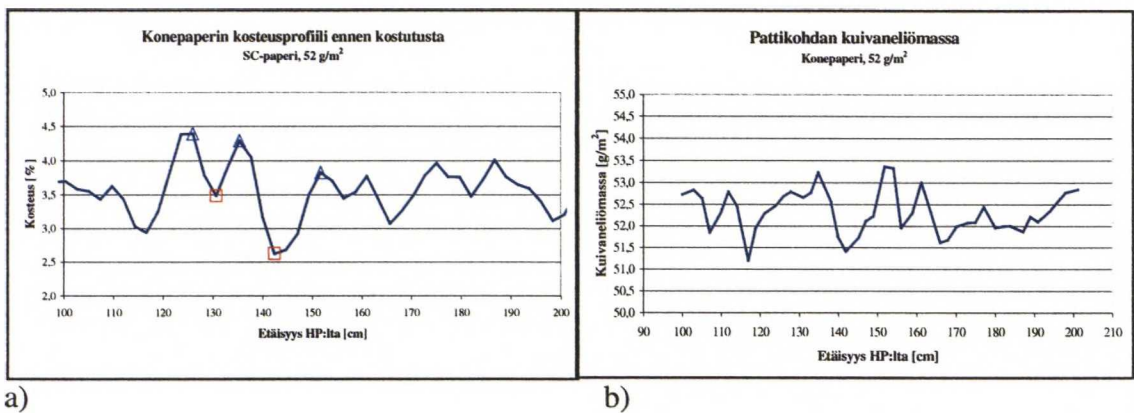
10.2.1 Kosteus

Paperin kosteus saatiin paperikoneen tiedonkeruujärjestelmästä. Tehtaalle osuneen ukkosmyrskyn ansiosta talteen saatiin vain kosteusprofiili ennen jälkikostutinta, mutta koneella olleen jälkikostuttimen jälkeistä kosteusprofiilia ei saatu rekisteröidyksi. Tämän vuoksi esimerkiksi rullavanan kohdalla kosteuden ja lämpötilan vertaaminen ei ole täysin luotettava. Kosteusprofiili on konerullan pyöriessä mitattujen arvojen keskiarvoprofiili alkua ja loppua lukuun ottamatta. Rullan pituudessa tämä tarkoittaa väliä 119 – 55731 m.

Suhteellisen kosteuden perusteella patti 3 poikkeaa muista pateista (kuva 38a). Pattien 1 ja 2 suhteellinen kosteus on selvästi ympäristöä korkeampi, mikä osaltaan kompensoi suuremman neliömassan aiheuttamaa paksuuden lisääntymistä. Tämä havaitaan selvästi vertailemalla kosteusprofiilia ja kuvaa 36b. Patit 1 ja 2 ovat tasoittuneet selvästi enemmän ympäristöönsä verrattuna kuin kuivempi patti 3. Tämän lisäksi patin 1 neliömassa on pienentynyt SC-paperin profiilin mukaan, mikä saattaa johtua kosteuden muutoksesta. Tätä päätelmää tukee myös kuvassa 38b oleva kosteuden ja neliömassan perusteella laskettu kuivaneliömassaprofiili.

Kosteusprofiilissa näkyy myös kuivaan suuntaan oleva piikki pattien 2 ja 3 välissä. Tämä johtuu osittain tuon kohdan selvästi alhaisemmasta neliömassasta. Tutkimuksissa huomattiin myös, että jälkikostuttimen suuttimista yksi oli tukossa ja tämä kohta oli juuri tuon kuumen ja kuivan alueen kohdalla. Tukkeutuneella suuttimella lienee huomattava vaikutus rullan jälkikostuttimen jälkeiseen kosteusprofiiliin ja vielä

laajempi vaikutus rullan lämpötilaprofiiliin, mitä käsitellään tässä osassa myöhemmin. Edellä mainitusta syystä johtuva suuri paikallinen kosteusvaihtelu saattaa olla myös syynä kuvassa 36b näkyvän paksuushuipun syntyyn, joka ei täsmää neliömassaprofiilissa ilmenevän huipun kanssa. Normaalialhaisemman kosteuden ja jyrkän neliömassamuutoksen vuoksi tuo alue ei ole puristunut yhtä helposti kasaan kuin viereiset alueet. Näihin päätelmiin on kuitenkin suhtauduttava varauksella, sillä saatavilla oli pelkästään pohjapaperista mitatut kosteudet. Tässä yhteydessä on myös mainittava, että kosteuden jyrkkyysprofiili tuo erittäin selvästi esiin suurimpien kosteusvaihteluiden olemassaolon ja sijainnin, mikä ei selvinnyt pelkän profiilitarkastelun perustella yhtä hyvin (liite 13).



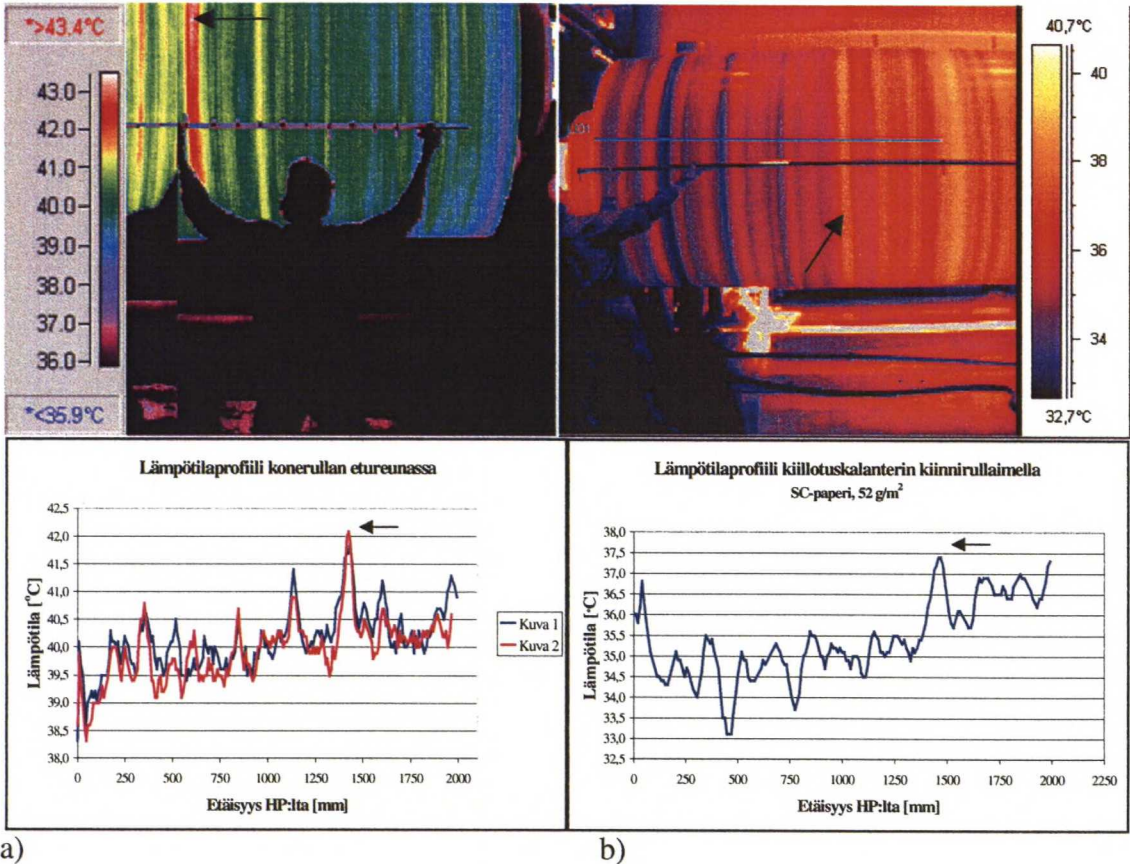
Kuva 38. a) Kosteusprofiili rullavanan kohdalla. Konepaperin pinnassa esiintyneet kuopat (□) ja huiput (Δ) on merkitty kuvaajaan. b) Kosteusprofiilin perusteella laskettu kuivaneliömassaprofiili.

10.2.2 Lämpötila

Kuvassa 39 on esitetty lämpökameralla otetut kuvat konerullan etureunasta ja niitä vastaavat kuvien perusteella kohdistetut lämpötilaprofiilit. Muut lämpötilaprofiiliin liittyvät tulokset ovat liitteessä 14. Kuva 39a on otettu koneella rullan etureunasta. Samasta kohdasta otettiin kaksi kuvaa noin minuutin välein ja kuvista piirretyt profiilit näkyvät kuvan alapuolella. Tästä nähdään, että lämpötilaprofiili oli melko stabiili muutamaa kohtaa lukuun ottamatta. Kuten kuvasta nähdään, vanan lämpötila vaihteli myös sen sisällä pituussuunnassa, mikä ilmenee kuvan 39a yläosassa näkyvänä

valkoisena alueena vanan keskellä. Tarkemmissa tutkimuksissa lämpötilan havaittiin kohonneen $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ vanan sisällä, kun ympäristöön verrattuna poikkeaman koko oli molemmissa tapauksissa keskimäärin $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kuva 39b on otettu kalanterilla rullan etureunasta, jossa näkyy jo koneella ilmennyt lämpövana.

Näiden havaintojen pohjalta voidaan päätellä, että pelkkien lämpökameralla otettujen kuvien perusteella ei halkaisijavaihtelun syntyä voida todeta yksiselitteisesti. Kuten kuvista nähdään, ei esimerkiksi pattien 1 ja 2 olemassaolo näy mittauksissa mitenkään. Tämän lisäksi profiileissa näkyvä lämpötilapiikki on niin leveä (välillä 140 – 151 cm), että sen kohdalle sattuu sekä pienemmän että suuremman halkaisijan alue. Mielenkiintoista on kuitenkin havaita, että patin 3 paksuushuippu sattui osumaan lämpötilaprofiilissa kohtaan, jossa lämpötilan muutos oli suurin. Kun lämpötilaprofiili kohdistettiin muiden mitattujen profiilien kanssa välillä 100-200 cm koneen etureunasta ja sen jälkeen laskettiin korrelaatiot näiden kesken, oli lämpötilan ja kosteuden välinen korrelaatio (-0,68) selvin. Neliömassan kanssa lämpötilalla ei ollut juuri minkäänlaista korrelaatiota, kun taas paksuuden kanssa oli havaittavissa heikko positiivinen (0,36) korrelaatio. Tämän lisäksi havaittiin, että monet rakenteelliset ja ympäristölliset tekijät saattavat vääristää mittaustuloksia. Esimerkiksi kiillotuskalanterilta otetuissa kuvissa havaittiin selvät leveät lämpötilavanat kalanterin ulosottotelojen laakeripesien kohdalla. Tällaisten vanojen ilmeneminen saattaa johtaa virheellisiin päätelmiin osuessaan rullavanan kohdalle, mikäli niiden todellinen syntyisyys ei ole tiedossa.



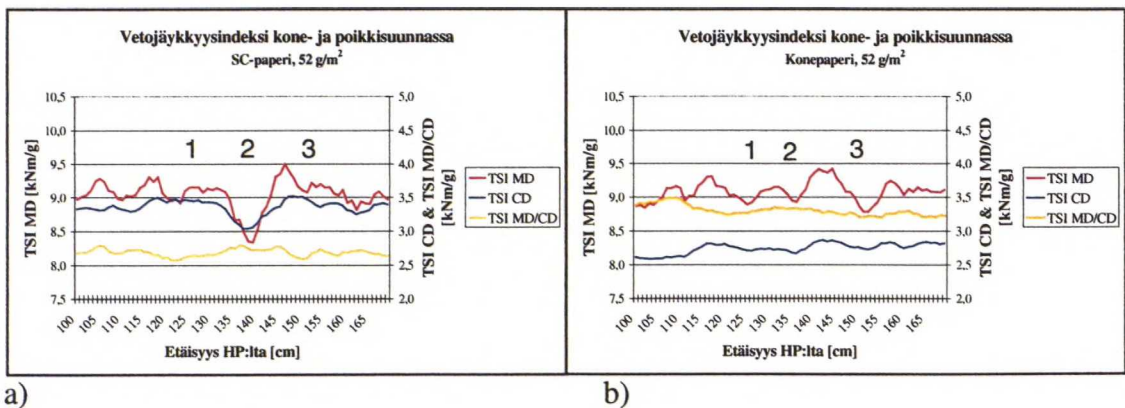
Kuva 39. a) Lämpötilaprofiili etureunassa koneen kiinnirullaimella. Profiili on piirretty kahdesta peräkkäin otetusta kuvasta. b) Lämpötilaprofiili etureunassa kalanterin kiinnirullaimella. Lämpötilaprofiili on esitetty kuvassa näkyvän sinisen viivan kohdalta, joka on pituudeltaan noin 2 m. Kuvassa näkyvä lämpötilapiikki on patin 2 ja 3 välissä (vrt. taulukko 8)

10.3 Vetojäykkyys (TSI) ja sen orientaatiokulma (TSO)

Vetojäykkyysmittausta muutettiin esikokeiden jälkeen siten, että koko profiilin lisäksi mittausta tehtiin kapealta väliltä (100 – 170 cm) mittavälillä 1 cm. Koko profiilin mittaustiedot ovat liitteessä 15. Tämän lisäksi mittalaitteen antamia arvoja käsiteltiin siten, että tulokset laskettiin uudestaan Tapio-analysointorin antamien neliömassamittausten mukaan. Normaalisti laitteeseen syötetään koko profiilista laskettu neliömassan keskiarvo, mutta tämä laskutapa antaa virheellisen vetojäykkyysindeksin.

Laitevalmistajan mukaan neliömassa tulisi mitata täsmälleen samasta kohdasta, mistä vetojäykkyys mitataan.

Kuvassa 40 näkyvät vetojäykkyydet, jotka on mitattu tiheällä mittavälillä. Näiden kuvien tulkintaa vaikeuttaa epätarkka kohdistus, mikä osaltaan johtui näytteen asettelusta mittalaitteeseen. Näiden kuvien ja koko koneen leveydeltä mitattujen profiilien perusteella voidaan kuitenkin vahvistaa käsitystä, jonka mukaan kalanterointi kasvattaa paperin vetojäykkyyttä /67/. Tämä ei kuitenkaan päde yksittäisiin poikkisuunnan kohtiin, kuten havaitaan patin 2 tapauksessa. Vertailemalla kuvia 40a ja 40b nähdään, että pattien 1 ja 3 kohdalta profiili on tasoittunut osittain kuituverkon tiivistymisen myötä, mutta patin 2 kohdalla paperin kimmo-ominaisuudet ovat selvästi heikentyneet. Syy tähän on todennäköisesti kalanteroinnista aiheutunut paperin rakenteen ruhjoutuminen. Tätä päätelmää tukee myös Tapio-analysaattorilla mitattujen neliömassa- ja paksuusprofiilien vertailu. Vertailtaessa patteja 2 ja 3 nähdään niiden kohdalla neliömassaprofiilissa selvät piikit, mutta paksuuden osalta ne eroavat toisistaan. Myös pohjan kosteudella ja lämpötilalla näyttää olevan vaikutusta, sillä patin 2 kohdassa on kosteus selvästi ympäristöä korkeampi ja lämpötilaprofiilissa (kuva 39a, punainen käyrä) näkyy lievästi kylmempi kohta juuri ennen lämpötilan rajua muutosta. Korrelaatioiden perusteella lämpötila vaikuttaa enemmän ($R = 0,73$) pohjapaperin kimmokertoimen muodostumiseen kuin kosteus ($R = -0,48$), mutta valmiin paperin kimmo-ominaisuudet muuttuvat lopulliselle tasolle kalanterointitapahtumassa.



Kuva 40. a) Vetojäykkyys rullavanan kohdalla SC-paperissa. b) Vetojäykkyys rullavanan kohdalla konepaperissa. Kuviin on merkitty pattikohdat.

Kuvasta 40b nähdään selvästi TSI-profiilissa olevat paikalliset minimiit suuremman halkaisijan kohdissa (vrt. taulukko 8). Vastaavasti kuumemmassa ja kuivemmassa kohdassa (kuoppa 2) vetojäykkyysindeksi ja samalla myös paperin konesuuntainen kimmokerroin on selvästi suurempi. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että kuumempi kohta oli pyrkinyt kutistumaan voimakkaammin, mutta kutistuma oli ollut pääosin estetty, mikä johti kimmokertoimen kasvuun. Tämä mekanismi on todettu myös kirjallisuudessa /71/. Vaikutus näkyi läpi kalanteroinnin, koska ko. kohta ei muokkautunut kalanterin nipissä viereisten alueiden tavoin. Tämä johti myös kyseisen kuoppakohdan kireyden kasvuun, mikä selviää myöhemmin käsiteltävistä kireysmittaustuloksista.

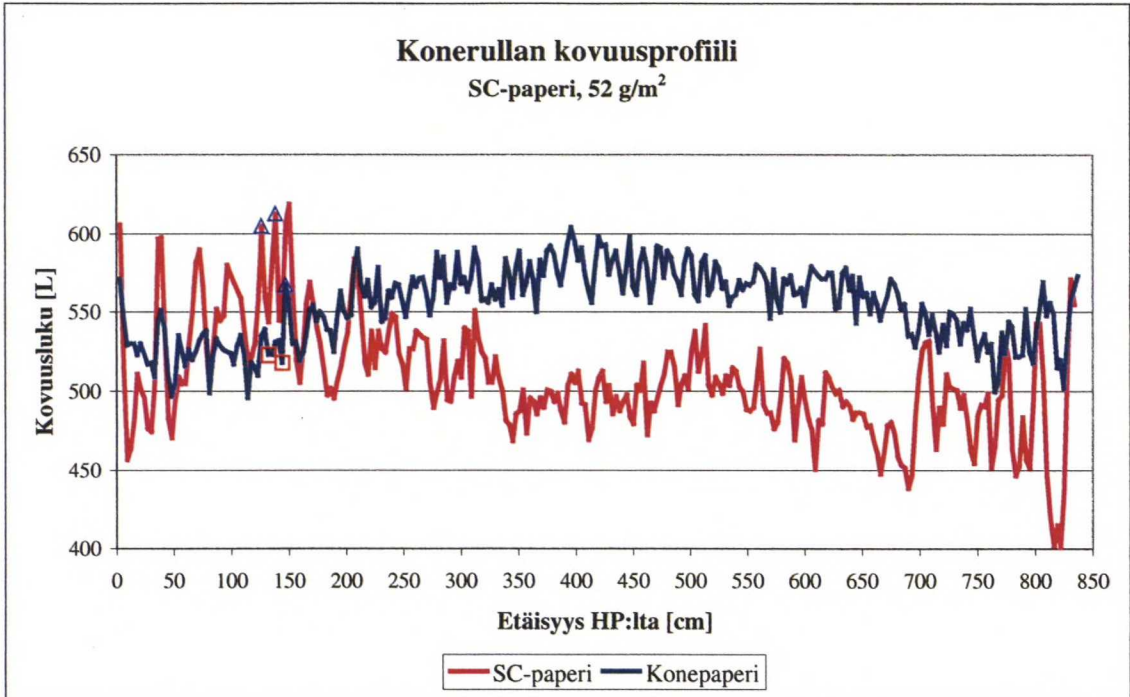
Vetojäykkyyden orientaatiokulmassa (TSO) vaihtelut eivät olleet yhtä selviä kuin TSI-arvoissa. Konepaperin profiilissa oli nähtävissä lievät suuremman orientaatiokulman piikit pattien reunoilla, mutta SC-paperissa ei ollut enää havaittavissa vaihteluita, jotka olisivat jollain tavalla kertoneet vanojen olemassaolosta. Vaihtelut konepaperissa kertovat osaltaan sen, että vanat olivat lähtöisin perälaatikon virtaushäiriöistä, mikä on johtanut kuituorientaation paikalliseen muutokseen. Tämä puolestaan on vaikuttanut selvästi vetojäykkyyden orientaatiokulman suuntaan. TSO-mittalaitteen tuloksista saatiin myös kosteuslaajenema (liite 15), jonka on kirjallisuudessa todettu olevan kääntäen verrannollinen poikkisuunnan vetojäykkyyteen /81/. Tämän perusteella voidaan siis päätellä, että patin 2 kohdalla kosteuden vaikutus kalanteroinnissa on ollut suurempi kuin muilla pateilla. Kalanteroinnin vaikutuksesta se oli menettänyt paksuuttaan, mutta samalla sen tiheys oli kasvanut. Tämä kohta oli levinnyt voimakkaasti sekä kone- että poikkisuunnassa.

Koska paperin lujuusprofiilissa on havaittavissa selviä eroja, on sillä vaikutusta myös venymien muodostumiseen ja sitä kautta rullan muotoon sekä leikkausjännitysten syntyyn. Näiden mittausten perusteella ei kuitenkaan voida eritellä rullalla tapahtuneiden venymämuutosten osuutta kokonaisvenymästä, mutta selvää on, että osa paksummista ja/tai suuremman neliömassan kohdista venyi sekä poikki- että konesuunnassa kalanteroinnin tuloksena ja osa relaxoitui rullalla johtaen rainan pussimaisen ilmeen syntyyn. SC-paperin konesuuntaisen kimmokertoimen perusteella

ei voitu ennustaa rullavanojen olemassaoloa eikä niiden muuttumista kireyseroiksi, mutta konepaperin profiileissa oli lievää yhdenmuotoisuutta. Esimerkiksi patin 2 kohdalla voidaan lujuusmittausten perusteella olettaa suurimman osan muodonmuutoksesta syntyneen kalanteroinnin tuloksena. Patin 3 tapauksessa puolestaan relaksaation osuus venymän synnystä oli oletettavasti suurempi kuin patissa 2. Tämä johtuu yksinkertaisesti patin syntytavasta, sillä patti 3 ei ole joutunut kauttaaltaan yhtä suuren puristavan ja samalla venyttävän voiman kohteeksi kalanteroinnissa ja näin ollen se on säilyttänyt jäykkyytensä paremmin kuin patti 2. Kireys- ja pituusprofiilimittausten mukaan tämä kohta on kuitenkin löysä ja pidempi, joten plastisen venymän on täytynyt syntyä myös paperin ollessa rullalla. Ilmiön luotettava selitys vaatisi venymien mittausta paperista juuri ennen kalanterointia, heti kalanteroinnin jälkeen ennen paperin rullalle menoa sekä myös pituusleikkauksessa, kun paperi on ollut rullalla pidemmän ajan. Tämän tapainen mittausta on nykyisin kuitenkin hyvin hankalaa ellei suorastaan mahdotonta.

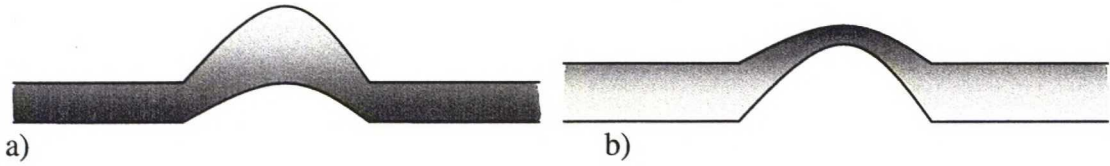
10.4 Rullan kovuus

Kuvassa 41 on kovuusprofiilit samasta konerullasta ennen ja jälkeen kalanteroinnin. Muut tulokset ovat liitteessä 16. Näistä profiileista nähdään, että kalanteroimattomasta konerullasta on kovuusmittausten avulla hyvin vaikea erottaa kalanteroinnin jälkeen selvemmin ilmeneviä vanoja. Tämä johtuu siitä, että paperin tiheys on konerullassa huomattavasti alhaisempi ja paperi mukautuu paremmin pinnan muotoihin. Monesti myös rullauskireys on kalanteroimattomassa konerullassa pienempi ja kireyserot poikkisuunnan eri kohtien välillä ovat pienempiä kuin kalanteroinnin jälkeen. Kerrosten välissä on enemmän ilmaa, mikä tasoittaa kovuusvaihteluita ja paperi on myös kokoonpuristuvampaa. Silmiinpistävää on, että kalanteroimattomasta konerullasta erottuu kohta, jonka kuivaneliömassa ja lämpötila olivat ympäristöä suurempia, mutta selvimmin pattikohdat erottuvat vasta SC-paperissa. Tämä kohta on merkitty kuvassa 41 sinisellä kolmiolla konepaperin profiilissa.



Kuva 41. Kovuusprofiilit ennen ja jälkeen kalanteroinnin samasta konerullasta. Siniset kolmiot osoittavat rullassa olleiden pattikohtien paikkaa ja punaiset neliöt osoittavat näiden välissä olleita kuoppia.

Kovuusmittausten avulla voitiin paikantaa hyvin kohdat, joissa esiintyi halkaisijavaihtelua, vaikka mittaus ei suoraan annakaan informaatiota paperin rakenteesta. Kovuusmittausten perusteella voidaan todeta, että patin synnyssä hallitsevin tekijä on paperin pakkautuminen ympäristöönsä tiiviimmäksi tiettyyn kohtaan rullassa. Tämä on seurausta joko paperissa olevasta paksummasta kohdasta tai suuremman neliömassan alueesta, jonka paksuus ei välttämättä eroa ympäristöstä. Kovuusmittausten perusteella voidaan päätellä, että patin muodostuminen ei ole seurausta kalanteroinnissa syntyvistä venymistä. Jos patti olisi muodostunut kuvan 42a mukaisesti, tulisi kovuuden ko. kohdassa olla huomattavasti ympäristöä alhaisempi. Näin käy esimerkiksi huokoisilla lajeilla, kuten tissue-paperirullilla.



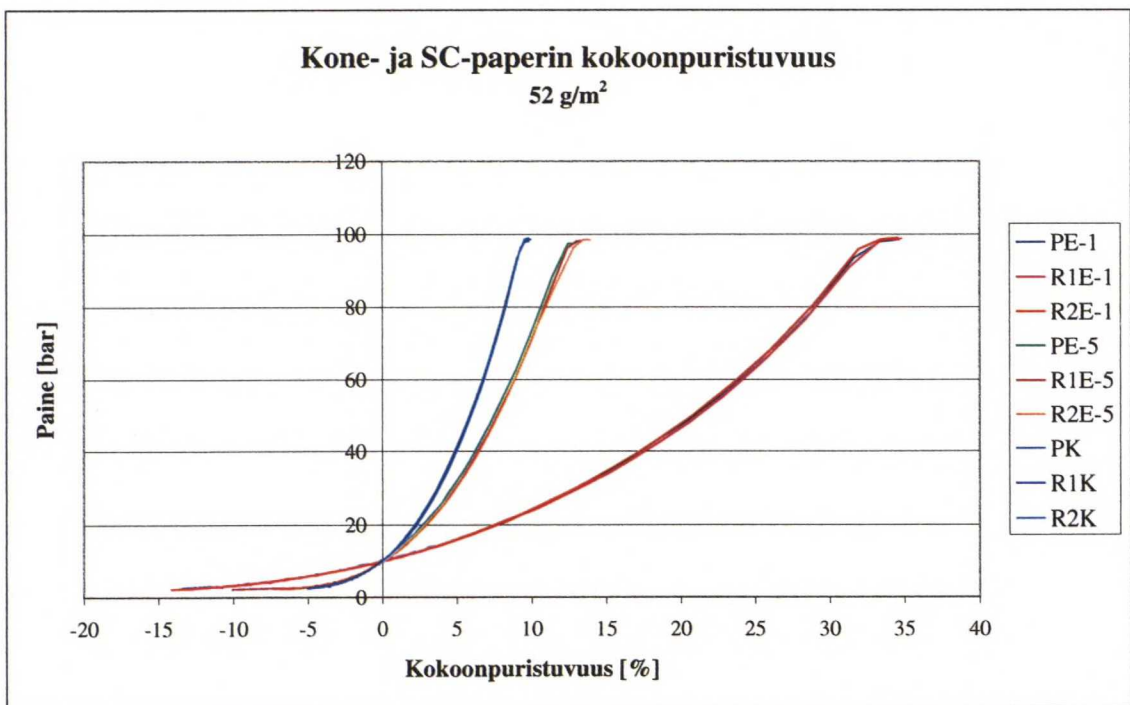
Kuva 42. a) Patin synty rainassa olevan venyneen ja pussimaisen kohdan kertautuessa ilman radan kunnollista levitystä. b) Patin synty rainassa olevan paksunnan ja/tai tiheämmän kohdan kertautuessa, kun rataa levitetään ennen kiinnirullainta voimakkaasti. Tumma alue kuvaa suuremman rullauskireyden aluetta.

Nyt kovuudet olivat kuitenkin pattikohdissa suurempia, joten olettaa saattaa, että pattikohdissa paperi oli rullautunut kireämmälle ja pattikohdat kannattelivat viereisiä alueita (kuva 42b). Tämä puolestaan johti siihen, että suuremman halkaisijan alueen vieressä rullan halkaisija oli normaalia suurempi, koska kerrosten välillä oli enemmän ilmaa ja näin ollen nämä alueet olivat myös kovuusmittausten mukaan pehmeämpiä. Saattaa toki olla mahdollista, että pattikohdan kovuutta laski hieman kuvan 42a mukainen ilmiö, mutta venymä ei ollut niin suuri, että se olisi kompensoinut paksuudesta tai suuremmasta neliömassasta aiheutuneen rullan halkaisijan kasvun. Tapio-mittauksista parhaiten kovuuden kanssa korreloivat transmissio (-0,77) ja paksuus (0,71). Neliömassan kanssa kovuus korreloi huonommin (0,32), mutta pattikohtien neliömassapiikit täsmäsivät hyvin kovuuspiikkien kanssa. Lisäksi rullautumiseen vaikuttaa radan levitys, joka riittävän voimakkaana riittää oikaisemaan rainan ennen rullalle menoa eikä kuvan 42a mukaista pattia synny. Rainan levityksen vaikutus rullan kovuuteen nähdään hyvin vertailemalla pituusleikattujen ja uudelleenrullattujen rullien kovuusprofiileja. Kapeiden rullien kohdalla osa leikkausjännityksistä poistuu ja raina pääsee leviämään vapaammin. Tällöin kerrokset asettuvat tiiviimmin poikkisuunnan eri kohdissa ja tämä näkyy myös kovuuserojen lievänä tasoittumisena. Tämän työn tulokset vahvistavat sitä käsitystä, jonka mukaan venymien ja rainan pussimaisen ilmeen synty on ennemminkin seurausta rullavanasta kuin päinvastoin. Lisäksi voidaan todeta, että käytetty kovuuden mittaustapa soveltuu hyvin halkaisijavaihteluiden tutkimiseen.

10.5 Kokoonpuristuvuus

Kokoonpuristuvuusmittauksilla pyrittiin saamaan tietoa rullalla olevan paperin käyttäytymisestä paineen vaikutuksen alaisuudessa. Tämän vuoksi kokoonpuristumismääritykset tehtiin Pfeifferin menetelmää mukaillen /15/ paperipinolla nousevaa painetta käyttäen. Näiden mittausten tuloksista on laajempi yhteenveto liitteessä 17.

Kuvassa 43 on piirretty kolmen eri vaiheen kokoonpuristumiskäyrät. Kuten kuvista nähdään, ovat erot 10 arkin pinoja puristettaessa niin pieniä, että ne eivät juurikaan erotu toisistaan. Kun mittaustuloksia tarkastellaan lähemmin, voidaan niiden perusteella



Kuva 43. Kokoonpuristuminen konerullan eri kohdissa. Referenssipaksuus on mitattu paineessa 10 bar. Koepisteiden nimeäminen: näytteen koodi = R1, R2, P. Kalanteroimaton = E, Kalanteroitu = K, puristuksen numero = -1, -2, -3, -4, -5. R1 tarkoittaa referenssipistettä 1 m etureunasta, R2 referenssipistettä 1,92 m etureunasta ja P on kohdasta patti 2 (kts. kuva 33).

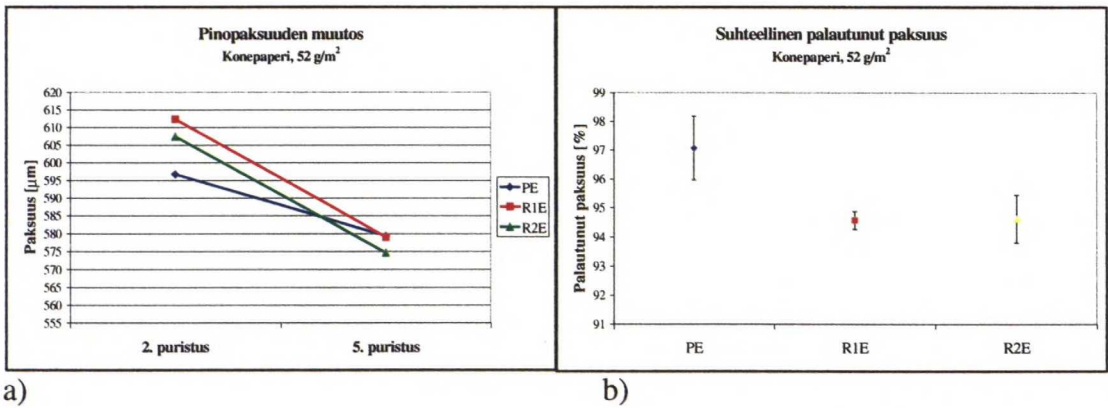
todeta, että ensimmäisellä puristuksella kalanteroimattomassa paperissa pinnan karheus vaikutti merkittävästi kokoonpuristuvuuteen. Kun pinoja puristettiin useammin, voitiin viidennellä puristuskerralla nähdä, että pattikohdan puristuvuus oli referenssikohtia hieman alhaisempi johtuen pääosin sen suuremmasta neliömassasta. Sama on myös nähtävissä kalanteroidun paperin kohdalla, kun pinoa puristettiin vain kerran. Kalanteroidun paperin kohdalla huomattiin, että pinon kokoonpuristuminen noudatti paksuusprofiilin mukaista järjestystä. Paksumpi pino puristui vähemmän kokoon. Esimerkiksi referenssin 1 ja patin paksuus olivat Tapio-analysaattorin paksuusmittauksen mukaan hyvin lähellä toisiaan, kun taas toisen referenssikohdan paksuus oli selvästi näitä kahta pienempi. Tämä käyttäytyminen on havaittu myös aikaisemmissa tutkimuksissa laboratorioarkeilla /55/. Puristumiskäyttäytymisen selittää suurelta osin paperin pinnan ja runkokerroksen erilainen kokoonpuristumistaipumus.

Yksi syy pienten erojen syntyyn on referenssipaksuuden valinnassa. Vertailukohdaksi valittiin paksuus, joka mitattiin paineella 10 bar, koska PURRE:n mittaustulokset ovat alussa epävarmoja paperin pinnan karheuden ja paineen epätasaisen nousun vuoksi. Tämä näkyy myös käyrien alkupään muodossa. Lisäksi on huomioitava, että esimerkiksi rullausnipissä vaikuttava paine on selvästi alle käytetyn referenssipaineen, jolloin erot ovat entistä pienempiä.

Vertailemalla käyriä keskenään voidaan havaita, että referenssipisteen valinnalla on suuri merkitys. Esimerkiksi tässä tapauksessa referenssi 2 erosi merkittävästi pattikohdasta, mutta referenssi 1:n kohdalla yhtä selvää eroa ei ollut havaittavissa. Jotta kokoonpuristumiserosta saataisiin luotettavaa tietoa, täytyisi suuremman pinon lisäksi koepisteitä ottaa koko konerullan leveydeltä useasta kohdasta. Tällä mittausten menetelmällä se olisi erittäin työlästä ja hidasta. Lisäksi paperikoneella olosuhteet poikkeavat laboratorio-olosuhteista, sillä esimerkiksi kosteus- ja lämpötilaerot ehtivät tasaantua ennen kokoonpuristumismäärytyksiä. Näillä ominaisuuksilla on vaikutusta myös tason suuntaisiin mittamuutoksiin, joita kokoonpuristuvuuskokeissa ei mitattu.

10.5.1 Palautuva paksuus

Mittaustuloksista laskettiin myös palautuneita paksuuksia eri koepisteiden ja puristusten välillä. Palautuvaa paksuutta on käsitelty kirjallisuusosan kappaleessa 4.2. Kuvassa 44 on laskettu palautuneet paksuudet eri koepisteille puristusten 2 ja 5 mukaisista paksuuksista referenssipaineen vallitessa. Tämän kuvan perusteella saadaan selvempi kuva patti- ja referenssikohtien käyttäytymisestä puristussykliä yhteydessä. Laskentaan valittiin toinen ja viides puristus, koska paksuus käyttäytyy ensimmäisellä puristuksella huomattavasti eri tavoin paperin pinnan karheuden vuoksi. Tulokset olivat saman suuntaisia myös neljännen ja viidennen puristuksen välillä eli ilman toistuvaa puristusta. Tulosten mukaan suuremman halkaisijan alueelta otettu kalanteroimaton paperi menetti paksuuttaan vähemmän kuin referenssikohtat, kun näitä puristetaan useamman kerran peräkkäin.

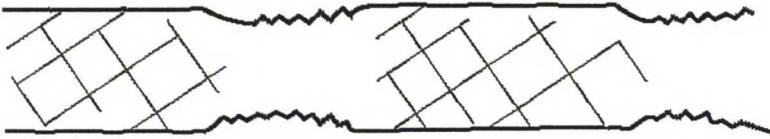


Kuva 44. a) Suhteellinen palautunut paksuus. Tulokset on laskettu viidennen ja toisen puristuksen paksuuksien suhteen paineen ollessa 10 bar. b) Pinopaksuuden palautuma kolmen puristuskerran jälkeen. PE = patti 2, R1E = referenssi 1 ja R2E = referenssi 2.

Samalla voidaan todeta, että pinnan karheus vääristää paperin paksuutta varsinkin silloin, kun mittauksilla pyritään löytämään hyvin pieniä eroja. Koska esimerkiksi Tapio-analysaattorin paksuusmittaus perustuu vapaasti paperin pinnalla liikkuvaan mittapähkään, on se herkkä pinnan karheudelle. Tätä tilannetta havainnollistaa kuva 45. Kun paksumpi kohta kalanteroituu tiiviimmäksi, sen pinnan karheus laskee. Kun viereisiin alueisiin ei kohdistu yhtä suuri puristusaine, näkyy tämä yksittäistä vapaata

arkkia mitattaessa tasaisempana näennäisenä paksuusprofiilina. Tällöin todenmukaisempi paksuutta kuvaava termi olisi tehollinen paksuus, jota harvoin mitataan paperista osittain sen epämääräisen määritelmän vuoksi.

Kuvissa näkyvien absoluuttisiin paksuuksiin täytyy suhtautua varauksella, sillä ne riippuvat kalibroinnista, joka on pitänyt suorittaa jokaiselle koepisteelle erikseen. Mittausten perusteella voidaan todeta, että plastinen muodonmuutos on ensimmäisen ja toisen puristuksen välillä suurempi pattikohdassa, mutta karheuksien tasoittuessa pattikohta näyttää olevan muita elastisempi.



Kuva 45. Kalanteroinnin vaikutus paperin rakenteeseen ja pinnan muotoihin /71/.

10.5.2 Tulosten sovitus matemaattiseen malliin

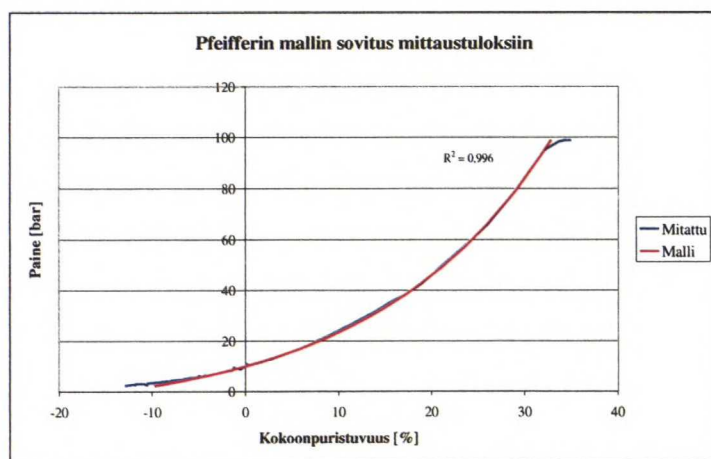
Mittaustulosten sovituksessa käytettiin Pfeifferin mallia, jonka avulla laskettiin myös paperin z-suuntainen kimmokerroin (kaava 4). Pfeifferin mallina käytettiin kaavan 3 mukaista lauseketta, mutta se muutettiin muotoon, jossa kokoonpuristuvuus voitiin määrittää paineen avulla. Kaava sai näin ollen muodon

$$\varepsilon = \frac{1}{K_2} \ln \left(\frac{P + K_1}{K_1} \right) \quad (10)$$

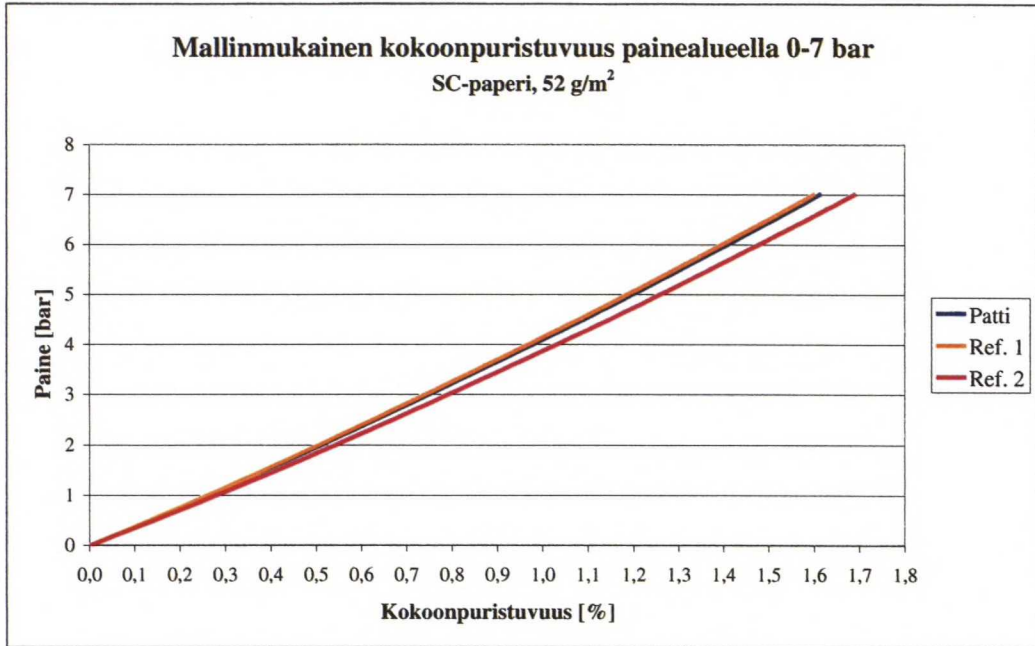
Merkkien selitykset löytyvät kaavan 3 yhteydestä. Sovitus tehtiin pienimmän neliösumman menetelmällä. Aikaisempien kokemusten mukaan mitatun ja mallin avulla lasketun arvon neliöllistä erotusta painotettiin paineen neliöllä /55/. Painotus tehtiin, koska pienillä paineilla saadut tulokset olisivat painottuneet ja mallin sovitus olisi ollut huono. Lisäksi sovituksen yhteydessä todellisesta puristuspainesta vähennettiin referenssipaine ($P_{\text{ref}} = 10 \text{ bar}$).

Kuvassa 46 on esimerkki Pfeifferin mallin sovituksista PURRE:n mittaustuloksiin. Kuvasta nähdään, että malli sopii kuvaamaan erittäin hyvin saatuja tuloksia. Sovitukset tehtiin jokaiselle rinnakkaismääritykselle erikseen ja näistä laskettiin keskiarvot sekä 95 %-luottamusvälit vakioille K_1 ja K_2 . Kaikissa tapauksissa mallin korrelaatio oli erittäin hyvä ($R^2 > 0,99$). Mallin perusteella laskettiin eri koepisteiden kokoonpuristuminen ja kimmokerroin esimerkkipaineilla 1,75 bar ja 40 bar. Vastaavalla paineella 1,75 bar on Pfeiffer /15/ laskenut kokoonpuristuvuuksia ja paperin z-suuntaisia kimmokertoimia sanomalehtipaperille. Tulokset eivät ole tällaisenaan vertailukelpoisia, mutta voidaan todeta, että SC-paperin z-suuntainen kimmokerroin on selvästi suurempi kuin huokoisemman sanomalehtipaperin.

Kuvassa 47 on laskettu mallin avulla paperin kokoonpuristuvuus välillä 0-7 bar, joka on rullaustapahtumassa relevantti alue. Tästä kuvasta nähdään, että referenssipiste 2 puristuu muita helpommin kasaan, mutta referenssipiste 1 ei juuri erotu pattikohdasta. Näiden käyrien perusteella esimerkiksi puristusaineessa 3 bar referenssi 2 puristuu suhteellisesti n. 6 % muita enemmän kasaan. Tällä tavoin voitaisiin teoriassa saada tietoa paperin laatuvihteluista ja rullan rakenteesta, mikäli riittävän pitkän kokemuksen pohjalta voidaan sanoa, milloin kokoonpuristuminen on laatuvihteluiden sallimissa rajoissa ja milloin ei. Käytännössä tämä on kuitenkin hankalaa.



Kuva 46. Pfeifferin mallin sovitus kokoonpuristumismittaustuloksiin. Mallin vakioiden arvot ovat $K_1 = 19,4$ bar ja $K_2 = 5,4$.



Kuva 47. Mallin avulla laskettu kokoonpuristuvuus eri koepisteissä. Vakiot: PK; $K_1 = 20,9$ bar, $K_2 = 17,9$, R1K; $K_1 = 22,1$ bar, $K_2 = 17,2$, R2K; $K_1 = 18,7$ bar, $K_2 = 18,8$.

Näiden mittausten pohjalta on kuitenkin vaikea todeta rullavanan käyttäytyvän poikkeavasti puristuspuheen alla, kun kyseessä on tiheä paperi. Etenkin tilastollisen analyysin käyttö vie tässä tapauksessa helposti harhaan, koska esimerkiksi varianssianalyysissä vaaditaan, että virhe on normaalijakautunutta. Koska paineen ja kokoonpuristuvuuden välinen suhde on epälineaarinen, on samalla olemassa riski, että myös virhe kasvaa epälineaarisesti paineen funktiona. Selvää on, että neliömassavanojen syntyessä myös erot kokoonpuristumistaipumuksessa korostuvat, kun useita paperikerroksia on päällekkäin.

10.6 Rainassa esiintyvien pituuserojen kvantitatiivinen määrittäminen osarainoista

Tämä mittaus oli alunperin tarkoitettu vertailukohdaksi kireysmittauksen yhteydessä suoritettavalle paperin pituusprofiilin määrittämiselle kireyden ja vetoerojen avulla. Koska kireyden ja vetoerojen avulla tehtävä määrittäminen ei onnistunut jo aikaisemmin mainituista syistä, jäi osarainoista mittaus ainoaksi menetelmäksi, jolla saatiin

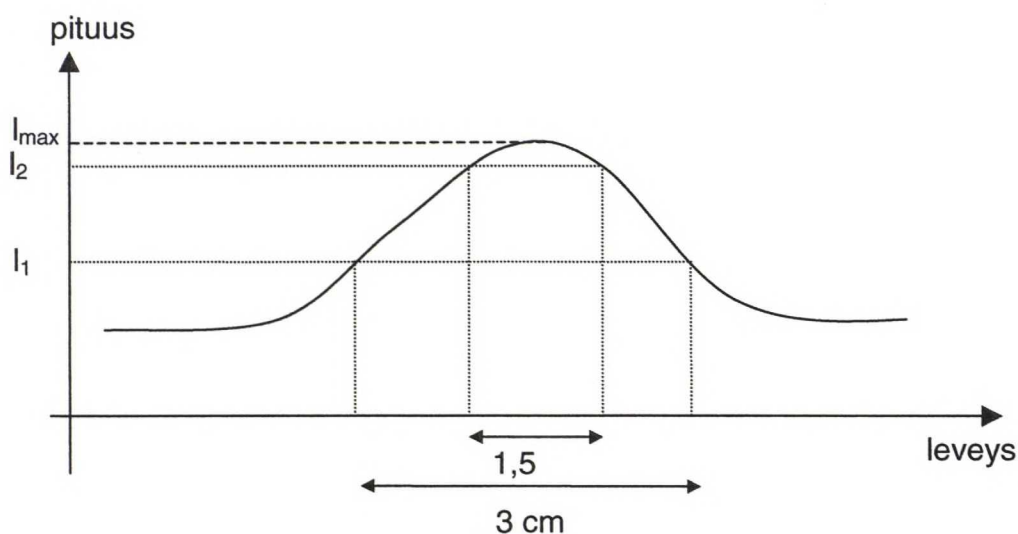
kvantitatiivista tietoa rainassa esiintyvistä pituuseroista. Tällä menetelmällä ei mitattu koko pituusprofiilia, vaan pituudet mitattiin vain venymien ääripäistä.

Taulukossa 9 ovat mittausten tulokset. Näyte 1 tarkoittaa ensiksi leikattua lyhyempää konesuuntaista näytettä, jossa erot eivät olleet kyllin selviä käytetyn mittausvälineen tarkkuuteen nähden. Näytteessä 2 erot eivät olleet suuria, mutta ne olivat selvästi nähtävissä. Suhteellisten pituuserojen suuruus on tällä menetelmällä mitattuna samaa luokkaa kuin kirjallisuudessa esiintyvät arvot /68, 73, 74, 75/. Lopullisen pituuseron arvioitiin olevan $\pm 0,5$ mm:n sisällä mitatusta arvosta, mikä absoluuttiseen pituuseroon nähden on melko huono tarkkuus. Mittauksen luotettavuus pyrittiin kuitenkin varmistamaan kahdella mittauskerralla, jotka molemmat antoivat täsmälleen saman tuloksen.

Taulukko 9. Osarainoista määritetyt pituudet rullavanaisesta paperista. Näytteet on otettu taulukon 8 mukaisista kohdista. Referenssipituus on leikepöydällä mitatun, rullan tasaisen pinnan kohdalta leikatun osarainan pituus jännityksettömässä tilassa

Konesuuntainen näyte	Näyte 1	Näyte 2
Referenssipituus [mm]	4282	13260
Pattikohdan 2 pituus [mm]	4283	13263
Pattikohdan 3 pituus [mm]	4283	13263
<i>Pattikohdan pituusero [mm]</i>	1	3
<i>Pattikohdan pituusero [%]</i>	0,023	0,023
Kuoppakohdan 2 pituus [mm]		13256
<i>Kuoppakohdan pituusero [mm]</i>		4
<i>Kuoppakohdan pituusero [%]</i>		-0,030

Leikkauskohdan lisäksi on merkitystä myös sillä, kuinka kapeiksi osarainat leikataan. Mittauksen yhteydessä havaittiin, että osarainat ovat juuri niin pitkiä kuin osarainan lyhin osa. Tätä havainnollistaa hyvin kuva 48. Aivan patin huipun kohdalla venymä on suurin (I_{max}) ja mikäli osaraina leikataan koko vanan leveydeltä, on osarainan vapaa pituus yhtä suuri kuin osarainan pituus aivan sen reunassa (I_1) eikä vanan keskellä.



Kuva 48. Osarainan leveyden vaikutus sen vapaaseen pituuteen patin 2 tapauksessa.

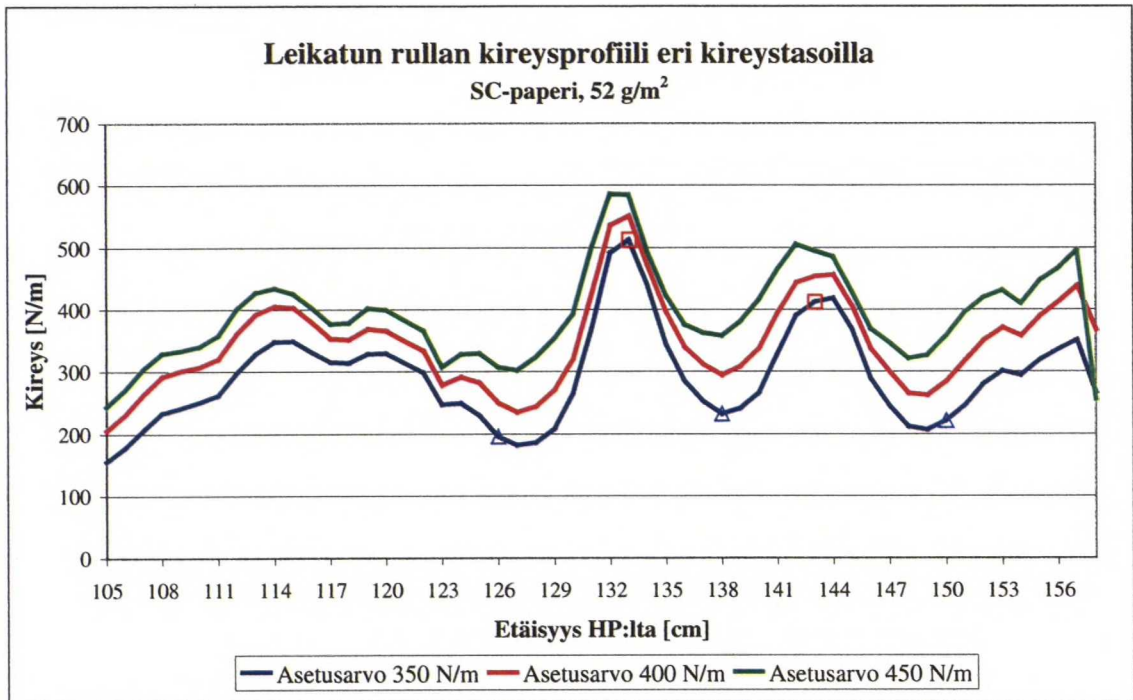
Venymien syntyyn vaikuttaa siis vanan muoto, joka on syytä ottaa huomioon leikkauksessa. Koska venymäerojen muutosnopeus on suurimmillaan vanan reunoilla, on osarainan leveydellä merkittävä vaikutus pituuden mittaukseen.

Nämä tulokset viittaavat siihen, että tässä tapauksessa merkittävimmät pituuserot ovat syntyneet kalanteroinnissa ja relaksaation osuus pysyvien venymien synnyssä on huomattavasti pienempi. Lif et al. [73] ovat tutkimuksissaan mitanneet puupitoisilla päällystämättömillä lajeilla kalanteroinnissa syntyviä konesuuntaisia pysyviä venymiä, jotka ovat luokkaa 0,02-0,03 %.

10.7 Ratakireysprofiili

Kuvassa 49 on esitetty kireyden keskiarvoprofiilit pituusleikatusta rullasta, joka oli leikattu rullavanan kohdalta. Tämä kuva antaa erittäin hyvän kuvan halkaisijavaihteluiden olemassaolosta. Kuvan perusteella voidaan todeta, että rullassa oleva kova kohta näkyy aukirullattaessa paikallisesti löysänä kohtana. Paikalliset kireyserot ovat huomattavasti suurempia kuin esikokeissa havaitut kireyserot ja on ilmeistä, että painatustuloksen kannalta tällaiset erot ovat erittäin haitallisia. Tuloksena on mm. radan kohdistus- ja ajettavuusongelmia, mikä huomattiin myös

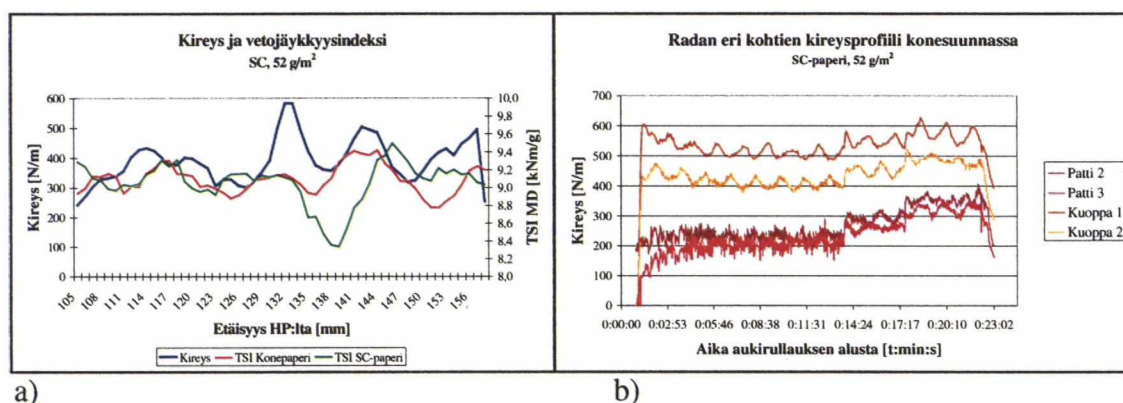
kireysmittauksen yhteydessä radan rauhattomana käyttäytymisenä. Nämä mittaukset tukevat VTT:n tutkimuksien tuloksia, joiden mukaan kireyden ja kovuuden välillä on erittäin selvä negatiivinen korrelaatio /67/.



Kuva 49. Pituusleikatun rullan kireysprofiili kireyden eri asetuseroilla. □ = kuoppa, Δ = patti, HP = koneen hoitopuoli eli etureuna.

Kuvasta voidaan havaita, kuinka kireystason nosto vaikutti kireyseroihin radan keskellä. Todennäköisesti myös patin 2 molemmin puolin olevat kireyspiikit nostavat sen kireyttä. Pääsääntöisesti voidaan sanoa, että kireystason nosto tasoitti kireyseroja, mutta tämä ei välttämättä päde kaikissa tapauksissa. Esimerkiksi kohdassa n. 143 cm etureunasta kireyden nousu oli lähes yhtä suuri kuin löysemmissä kohdissa. Tämä johtuu todennäköisesti paperin ominaisuuksista. Koska tuo kohta ei ollut kalanteroitunut pattikohtien tavoin ja sen välittömässä läheisyydessä oli paksuusprofiilissa piikki, kohdistui kasvava veto erityisesti tuohon kohtaan. Samassa kohdassa oli myös vetolujuusmittausten mukaan ympäristöä suurempi vetojäykkyys (TSI). Erityisesti paksuusprofiilia tarkastelemalla voidaan löytää selitys myös kahden kuoppakohdan kireyserolle. Paksuudeltaan pienempi kuoppa 1 on kireämpi kuin kuoppa 2.

Mielenkiintoinen havainto kireysprofiilin tarkastelun yhteydessä on sen muoto, joka on huomattavasti lähempänä konepaperin kuin SC-paperin vetojäykkyysprofiilia. Tämä näkyy kuvassa 50a. Vertailtaessa kireys- ja konepaperin vetojäykkyysprofiilia, on syytä muistaa, että kireys on mitattu SC-paperista. Vaikka rainan lopulliset kireys- ja lujuusominaisuudet muodostuvat kiillotuskalanterilla, saattaisi näiden tulosten pohjalta olla mahdollisuus ennustaa pattikohdan venymän synty lujuusominaisuuksien perusteella jo paperikoneella ennen kalanterointia.



a)

b)

Kuva 50. a) Kireys- ja vetojäykkyysprofiileiden vertailu. b) Kireyden kehittyminen patti- ja kuoppakohdissa kireysmittauksen aikana.

Kireysmittauksen yhteydessä havaittiin rullaa kääntämällä, että pilot-laitteen rakenteesta johtuen kireysprofiili oli hiukan vino. Tämä näkyy myös kuvasta 49. Lisäksi mittauksissa havaittiin, että relaxaation vaikutus näkyi selvimmin rullan pinnassa etenkin pattikohtien kireyden laskuna. Tämä näkyy myös kuvan 50b kireyskäyrien alun erilaisena muotona.

11 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli pyrkiä selvittämään, mitkä paperin ominaisuudet ovat rullavanan kannalta merkittäviä ja millä menetelmillä niitä voitaisiin mitata kvantitatiivisesti, jotta niistä johtuvat rullausviat voitaisiin selittää ja välttää.

Tarkoituksena oli vahvistaa ja lisätä tietämystä rullaustapahtumasta ja edistää erilaisten profiilien hallintaa ja käyttöä vanaisuuden ja rullarakenteen kannalta.

Kirjallisuusosassa selvitettiin rullaustapahtumaa sekä rullan rakennetta ja siihen vaikuttavia paperin ominaisuuksia yleisesti. Seuraavassa vaiheessa luonnehdittiin rullavanaa tarkemmin mm. käsitteenä ja muototarkastelulla. Tässä yhteydessä paneuduttiin rullavan synnymekanismeihin ja sen synnyn mahdollisiin ehkäisymenetelmiin. Loppuosassa käsiteltiin paperifysikaalisesta näkökulmasta tärkeimpien paperin rakenne- ja ominaisuusprofiilien yhteyttä rullavanaan sekä paksuusvanan käyttäytymistä nipissä ja eri rullausvaiheissa. Kirjallisuusosan pohjalta päädyttiin valitsemaan tietyt olemassa olevat menetelmät analyysien tekoon. Valinta tehtiin siten, että tärkeimmät paperin ja konerullan rakennetta tai ominaisuutta kuvaavat osa-alueet voitiin kattaa. Luonnehdinta tehtiin tarkastelemalla sekä rakenne-, ominaisuus- että tilasuureita.

Kokeellinen osa jakautui kahteen osaan siten, että ensin pyrittiin esikokeilla varmistamaan ennalta valittujen mittausmenetelmien soveltuvuus rullavan havaitsemiseen. Varsinaisilla kokeilla pyrittiin sitten mittaamaan muutoksia, joita päällystämättömän painopaperin konerullassa tapahtui kalanteroinnin seurauksena. Esikokeisiin valituista mittausmenetelmistä pääosa näytti soveltuvan hyvin rullavan analysointiin, mutta osa mittauksista todettiin esikokeiden perusteella joko liian epäluotettavaksi tai liian epätarkaksi. Osa näistä poisjätetyistä mittausmenetelmistä korvattiin varsinaisissa kokeissa toisilla perinteisimmillä menetelmillä.

Esikokeiden perusteella todettiin, että paperin rakennesuureista neliömassa ja paksuus ovat merkittäviä rullavan synnyn kannalta. Näiden profiileita tulee tarkastella rinnakkain. Pelkkä tiheysprofiilin tarkastelu ei ole rullavan havaitsemisen kannalta paras vaihtoehto. Samassa yhteydessä todettiin, että paperin ominaissuureiden tarkastelu rakennesuureiden rinnalla tukee rullavan havaitsemista. Näistä parhaimmin rullavana olemassaoloa indikoivat valon transmissio, joka on käytännössä opasiteetin käänteisluku, sekä kiilto. Mekaanisten ominaisuuksien kohdalla luotettavia päätelmiä ei voitu tehdä johtuen liian epätarkasta mittauksesta. Tilasuureista lämpötilan merkitys jäi

epäselväksi johtuen epätarkasta kohdistuksesta, mutta kireyden ja kovuuden yhteys rullavanaan oli selvä SC-paperilla. LWC-paperilla pattikohdan kireyden todettiin käyttäytyvän erilalla kuin SC-paperilla. Syy tähän lienee ollut vanan syntymekanismissa. Tämä kohta oli joutunut pienemmän puristuksen kohteeksi kalanterin nipissä eikä se näin ollen ollut venynyt muita kohtia selvemmin.

Varsinaisten kokeiden tulosten perusteella tehtiin johtopäätöksiä rullavanan kannalta merkittävistä ominaisuuksista sekä mittausmenetelmistä, jotka sopivat rullavanan kvantitatiiviseen analysointiin. Saatujen tulosten mukaan rullavanan ehkäisyyn kannalta SC-paperissa on olennaista kuivaneliömassan, paksuuden, kosteuden ja kireyden piikikkyyden sekä rajujen paikallisten profiilimuutosten vähentäminen. Näiden ja muiden mitattujen ominaisuuksien perusteella konerullan halkaisijavaihtelut johtuivat pääosin paperissa olevasta paikallisesta tiheyspoikkeamasta tai suuremmasta neliömassasta. Nämä ilmenivät paperissa joko paksumpina tai vähemmän kokoonpuristuvina kohtina. Kalanteroinnin seurauksena nämä kohdat muuttuivat useimmiten kireydeltään huomattavasti löysemmiksi alueiksi ja niiden haitallisuutta lisäsi normaalia kireämmän kohdan sijainti löysän kohdan välittömässä läheisyydessä. Kireyseroja rainaan voi syntyä vanojen ohella myös lajikohtaisesti muista syistä. Liitteessä 18 on esitetty taulukko, jossa on esitetty eri vanatyypin erottuminen muista poikkisuunnan kohdista paperin rakenne-, ominais- ja tilasuureiden perusteella. Taulukko on tehty tämän tutkimuksen perusteella, joten se ei ole kaikilta osin yleispätevä, koska kaikista vanatyypeistä ei saatu edustavaa otosta.

Käytetyistä laboratoriomittausmenetelmistä parhaiten rullavanan kvantitatiiviseen analysointiin soveltui Tapio-analysaattori. Erityisesti Tapio-analysaattoriin asennettu suorakulmainen neliömassa-anturi osoittautui käyttökelpoiseksi stabiilien neliömassavanojen havaitsemisessa laboratorio-olosuhteissa. Kokoonpuristumisessa ei pystytty havaitsemaan KCL-PURRE –mittalaitteella merkittäviä eroja poikkisuunnan eri kohtien välillä, mutta syklisessä puristuksessa havaittiin pattikohdan suhteellisen palautuvan paksuuden olevan merkittävästi referenssikohtia suurempi.

Prosessin tilaa mittaavista menetelmistä parhaaksi analyysityökaluksi osoittautui PAROtester2 –kovuusmittauslaite. Se ei varsinaisesti mittaa paperin rakennetta, mutta antaa tietoa rullan rakenteesta, johon rullavanalla on selvä vaikutus. IQTension™ –kireysmittauspalkilla pystyttiin saamaan erittäin selvästi esille paikalliset kireyserot, joita ilmenee rullavanojen yhteydessä. Kireysprofiilin muotoa selittää parhaiten paperiin syntyvät pysyvät venymät, joiden suuruutta mitattiin osarainojen avulla. Paperin kimmokerroinprofiilin muoto ei vastannut kireysprofiilia läheskään yhtä hyvin. Lämpökamera ei sellaisenaan sovellu halkaisijavaihteluiden toteamiseen, mutta siitä on hyötyä lämpötila- ja kosteusvanojen havaitsemisessa, jotka molemmat edesauttavat halkaisijavaihteluiden syntyä. Lämpökamera yhdessä on-line –mittauksesta saatavan kosteusprofiilin kanssa tukee hyvin päätelmiä.

Rullavan synnyn ehkäisy vaatii paperikoneen toimielinten hyvää tuntemusta ja toimivan säätöjärjestelmän. Jotta vanojen synty konerulliin voidaan ehkäistä tai niitä voitaisiin lieventää, täytyy säätöjärjestelmässä kohdistusten olla kunnossa, antureiden ja toimielinten tulee olla riittävän kapeita ja mittausten esittämiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Toimielinten kohdalla mainittakoon esimerkiksi laimennusperälaatikko, jonka käyttöönotto lisää neliömassaprofiilin säätöpotentiaalia ja antaa sitä kautta mahdollisuuden hallita rullavanoja entistä paremmin. Tällä hetkellä paras keino lieventää rullavanojen haittavaikutusta rullaimella on konerullan oskillointi. Mittausten esittämisessä tulisi erityisesti kiinnittää huomiota siihen, että tulosten avulla saadaan mahdollisimman todellinen kuva profiilin luonteesta. Tähän ei riitä pelkästään nykyisin käytetty, säätöjärjestelmän toimivuutta kuvaava suure keskihajonta tai suodatettujen keskiarvoprofiilien tarkastelu. Rullavan havaitsemisen kannalta olisi oleellista tarkastella profiilin muotoparametrien muutoksia. Tämä voisi käytännössä tarkoittaa uusien tunnuslukujen käyttöönottoa, joista eräs voisi olla jyrkkyystekijä. Jyrkkyystekijääkin havainnollisempi profiilin luonnetta kuvaava ominaisuus olisi jyrkkyysprofiilin piirtäminen tärkeimmistä ominaisuuksista. Näiden lisäksi profiilista voitaisiin saada parempi kuva piirtämällä päällekkäin suodatettuja ja suodattamattomia profiileja samaan kuvaan.

Rullavanoja koskien eräs mittausteknisesti merkittävä tekijä on karheuden vaikutuksen eliminointi paksuusmittauksessa. Huomiota tulee kiinnittää enemmän itse mittaustekniikkaan kuin laitteeseen. Yksittäisen arkin paksuuden mittaaminen ei aina anna todellista kuvaa etenkin rullalla olevasta paperista. Tämän vuoksi alle 1 µm:n erojen hakeminen paksuusmittauksella ei ole edes mielekäästä, koska pelkästään näytteiden käsittelyllä ja ympäristöolosuhteilla saadaan paperin pintaan merkittäviä muutoksia aikaan. Vanaisuuden kannalta merkittävänä, rullalla olevan paperin paksuutta tulisi mitata riittävän paksun pinon avulla ja mieluummin sillä paineella, joka vaikuttaa rullassa.

12 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA

Työn aikana tuli esille monta mielenkiintoista ideaa ja ongelmaa, joiden parissa saattaa olla syytä jatkaa tutkimuksia tämän jälkeen. Näistä eräs profiilin hallintaan liittyvä aihepiiri olisi profiilin muotoa kuvaavien tunnuslukujen sovellusmahdollisuuksien tutkiminen käytännössä. Nämä joko yhdessä tai erikseen nykyisten tunnuslukujen kanssa voisivat muodostaa perustan säätöjärjestelmälle, jolla voitaisiin hallita paremmin jyrkkiä, ajettavuuden kannalta haitallisia vaihteluita. Toinen prosessin hallintaan liittyvä jatkotutkimuskohde olisi paperin jäähtyminen ja sen vaikutus rullan rakenteeseen. Käytännössä on havaittu, että jäähtymällä näyttäisi olevan halkaisijavaihteluita lievästi tasoittava vaikutus etenkin päällystetyillä papereilla /28/, mutta tutkittua tietoa ilmiöstä ei juurikaan ole saatavilla.

Mittausmenetelmistä jatkotutkimus- ja kehityskohteiksi sopisivat Tapio-analysaattori, kokoonpuristumismittalaite ja on-line -kovuusprofiilimittaus. Tapio-analysaattoria voitaisiin hyödyntää entistä paremmin esimerkiksi vanojen luonnehdinnassa (korkeus, leveys, sijainti yms.) ja sen avulla saattaisi pystyä mittaamaan pituuseroja kapeista kiekkoista, jotka on leikattu poikkisuunnan eri positioista. Käytännössä Tapio-analysaattorilla voidaan rullata näyterullat tiettyyn vakiokireyteen ja mitata tämän jälkeen niiden pituus hyvinkin tarkasti, mutta ongelmia tuottaa tällä hetkellä lähinnä kapeiden rullien leikkaus ja niiden ajettavuus.

Rullalla olevan paperin kokoonpuristumismääriä varten tulisi kehittää laite, jolla voitaisiin puristaa useamman senttimetrin korkuista paperipinoa. Samalla siihen voitaisiin kohdistaa tason suuntaisia vetoja, jotta saataisiin lisätietoa paperipinon puristumisesta jännityksen alaisuudessa.

On-line -kovuusmittausta varten on olemassa laite, joka tunnetaan myös nimellä BTF (Backtender's Friend) /82/. Samaan tekniikkaan perustuu myös Metson IQHardness™, mutta sitä ei markkinoida tällä hetkellä aktiivisesti. Laitteen ongelmana on sen mittausturinin lukupään hitaus, joka rajoittaa sen käyttöä yli 1400 m/min nopeudessa. Muita ongelmia ovat sen lukupään alhainen käyttöikä ja lisäksi laite tarvitsee oman mittaraamin, joka on tyypillisesti asennettu rullaimen alle. Itse mittaus perustuu pietsosähkökiteellä toimivan anturin mittaamaan paineimpulssiin, joka syntyy anturin ja rullan välisessä kontaktissa. Laitteen huonoa soveltuvuutta mittaustarkoitukseen on perusteltu sillä, että se ei kerro todellista paperin paksuutta. Tämä ei kuitenkaan ole näiden tutkimusten perusteella ainoa rullavanan syntyyn vaikuttava tekijä, sillä neliömassalla on myös merkittävä osuus sen synnyssä. Lisäksi on havaittu, että tasaisempi kovuusprofiili indikoi tasaisempaa kireysprofiilia, mikä puolestaan parantaa ajettavuutta painokoneella.

LÄHDELUETTELO

1. Anon., Sirius – the future of winding technology. esite, Voith Sulzer Paper Technology, 1998. 6 s.
2. Lannes, P. & Kojo, T., Konerullaus. Helsinki 2001. AEL Metsäteollisuuden koulutuskeskus, Julkaisu P150627. Paperikoneen kuivan pään toiminnot, Taitokurssit, 70 s.
3. Kramer, G., Advancements in Reeling. 86th Annual Meeting, Montreal, Que, Feb 1-3, 2000. Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal, 2000. s. C311-C315.
4. KnowPap: Tuotantoprosessit, Paperin valmistus, Jälkikäsittely, Rullaukset [online]. VTT Automation [viitattu 28.08.2001]. Vaatii käyttäjätunnuksen. Saatavilla www-muodossa
<URL:http://forus.valmet.com/paper/KnowPap/suomi/knowpap_system/user_interfaces/pap_machines/reeling.htm>.
5. Roisum, D.R., The Mechanics of Winding. TAPPI Press, Atlanta, GA, 1994, 237 s.
6. Pfeiffer, J.D., Mechanics of a rolling nip on paper webs. Tappi 51(1968)8, s. 77A-85A.
7. Pfeiffer, J.D., Nip forces and their effect on wound-in tension. Tappi 60(1977)2, s. 115-117.
8. Koskimies, J., Pope- ja vicklerrullaus. VALMET Oy, Tutkimusosasto, julkaisematon seloste, 10.10.1969. 19 s.
9. Lindahl, J., LWC-paperin konerullaus ja siinä syntyvät rullanpohjavauriot, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo, 1985, 101 s.
10. Dahl, C., Marchica, L. & Patton, W., Saving paper with proper reeling and winding. 85th Annual Meeting, Montreal, Que, Jan 26-29, 1999. Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal, 2000. s. B429-B433.
11. Fabritius, K., Gorges, J. & Patton, W., Third generation reeling. TAPPI 99 – preparing for the next millennium. Atlanta, GA, Mar 1-4, 1999. TAPPI Press, Atlanta, 1999. s. 1293-1301.

12. Matuska, R.T. & Pomroy, T.J., Operating results of the TNT™ reel. 86th Annual Meeting, Montreal, Que, Feb 1-3, 2000. Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal, 2000. s. C89-C94.
13. Brauns, R.A., Improving operating efficiency at the paper machine reel with a TNT-C™. 49th APPITA Annual General Conference. Hobart, Australia, Apr 3-7, 1995. APPITA, Carlton, 1995. s. 83-86.
14. Wohlfahrt, M., Thomas, R. & Martin, T., A new generation reeling concept for winding. Pap. Asia 14(1998)9, s. 38-40.
15. Pfeiffer, J.D., Using paper compressibility measurements to enhance roll quality, 1996 Finishing and converting conference. Bal Harbor, FL, Oct. 6-9, 1996. TAPPI Press, Atlanta, 1996. s. 111-117.
16. Hall, K.M. & McLemore, C.E., Mill Experience in Improving Mechanical Reel Condition. 1989 Finishing and Converting Conference. Kansas City, MO, Oct 1-5, 1989. TAPPI Press, Atlanta, 1989. s. 87-95.
17. Airola, N., Happonen, E., Jorkama, M., Kojo, T., Komulainen, P., Luomi, S., Malinen, U., Paanasalo, J., Rautakorpi, T., Turunen, I. & Veräjänkorva, J., Reeling and winding. Papermaking, Part 3 Finishing, Toim. Gullichsen, J., Paulapuro, H., & Jokio, M., Julk. Fapet Oy, Helsinki, 1999, s. 141-236.
18. Roisum, D.R., Reading a roll. Tappi J. 81(1998)4, s. 205-211.
19. von Herten, L., Paperin kitkan ja muiden materiaaliominaisuuksien merkitys sen rullattavuudelle, Väliraportti. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan laitos, Espoo 2000, 14 s.
20. Smith, R. Duane, Roll and Web Defect Terminology, TAPPI Press, Atlanta, 1995, 254 s.
21. Quint, R.J., Measurement and Control of Paper Roll Condition. Tappi 51(1968)9, s. 373-378.
22. Roisum, D.R., A History Of Paper Stresses: Before, During And After Winding. Paper Age 102(1986)10, s. 44-46.
23. Pakarinen, P., Paperin vikaisuudet ja niiden analysointi; vanaisuus, kupruilu, käyristyminen. Helsinki 2000. AEL Metsäteollisuuden koulutuskeskus, Julkaisu P905602/00, Kuituverkon rakenne ja toimivuus painatuksessa, Insko-seminaari. 15 s.

24. Ritala, R., Niemi, K. & Valtonen, E., Paperin laatuominaisuuksien mittaus. Espoo 1993, KCL, Raina-tutkimusohjelma. Raportti 11. 48 s.
25. Juvonen, K., Paperin juovaisuuden mittaus- ja analysointimenetelmän kehittäminen, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, teknillisen fysiikan osasto, Espoo 1983, 88 s. + liitteet.
26. Baum, G.A., Prospects in Paper Technology. Espoo 1999, Teknillistieteellinen akatemia, Acta Polytechnica Scandinavia, Chemical Technology Series No. 272, 30 s.
27. Karlsson, H., Lundqvist, I. & Östman, T., Principles and potentials of CD-basis weight control. Eucepa Symposium Control Systems in the Pulp and Paper Industry. Stockholm, May 11-14, 1982. Eucepa, Stockholm, 1982. s. 238-243.
28. Pakarinen, P., Metso Paper Oy, Rautpohja, haastattelu 20.02.2001.
29. Hevenor, M.G., Eliminating sources of ridges in paper rolls. Tappi 60(1977)10, s. 63-65.
30. Lavigne, J., Pulp & Paper Dictionary, 3. painos, Miller Freeman Inc., San Francisco, CA, 1998, 452 s.
31. Vuori, M., Paperin profiilien ja eräiden superkalanterin hallinta- ja rakennetekijöiden vaikutus superkalanterin telaprofiileihin ja SC-syväpainopaperin ominaisuuksiin, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo 1990, 126 s.
32. Schlupp, K. & Karila, S., Surface stability of high speed headbox slice jets. Espoo 1996, KCL, PSC Communications 91, 41 s.
33. Schlupp, K., Characteristics of a headbox slice jet at elevated speed, Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo 2000, 98 s.
34. Hämäläinen, J.P. & Tarvainen, P., CFD-Based shape and control optimization applied to a paper machine headbox. 86th Annual meeting. Montreal, Que, Feb 1-3, 2000. Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal, 2000. s. A99-A102.
35. Fu, Y., Dumont, G. & Davies, M., A nonlinear model for the paper machine dry weight CD profile. Nord. Pulp Pap. Res. J. 10(1995)2, s. 129-132.

36. Schlupp, K., Laitteiston suunnittelu nopean paperikoneen perälaatikon toiminnan kokeelliseen tarkasteluun, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, Espoo 1993, 104 s.
37. Mardon, J., Headboxes: A literature review. Leatherhead, UK, 1994, Pira International, Pira reviews of pulp and paper technology, 94 s.
38. Begemann, U., Consistency cross direction profile: prerequisites for a successful installation. *Papier* 52(1998)6, s. 344-348, 351-354.
39. Ohnesorg, W. & Wurster, H., Conversion of paper machine headboxes for the production of press papers. *Papier* 52(1998)6, s. 357-360, 363-365.
40. Yli-Kauppila, J., Koskimies, J. & Ihalainen, J., Fliessverhalten des Stoffstrahls aus einem Stoffauflauf. *Wochenbl. Papierfabr.* 116(1988)1, s. 11-15.
41. Pakarinen, P. & Kiviranta, A., A new insight into fiber orientation streaks. Tappi Papermaker's conference 2001. Cincinnati, OH, Mar 11-14, 2001. TAPPI Press, Atlanta, 2001. Session 3: Paper Properties, 8 s.
42. Aidun, C.K., Quantitative evaluation of the forming jet delivered from four different hydraulic headboxes using high speed digital imaging. *Tappi J.* 81(1998)4, s. 172-179.
43. Aidun, C.K., Hydrodynamics of streaks on the forming table. TAPPI 1996 Engineering Conference. Chicago, ILL, Sept 16-19, 1996. TAPPI Press, Atlanta, 1996. s. 209-219
44. Hall, M.S. & Jackson, T.G., Small-scale variation in CD strips observed using ultrasonic velocity measurements. XIV IMEKO world congress. New measurements – challenges and visions. International CD symposium 97 cross directional web measurement, controls and actuator systems in paper machines. Tampere, June 4-5, 1997. Finnish Society of Automation, Helsinki, 1997. s. 174-179.
45. Kilpeläinen, R., puhelinhaastattelu 22.02.2001.
46. Paetow, R., Bewertung von Querprofilen – am Beispiel von Otro-Querprofilen. *Wochenbl. Papierfabr.* 123(1994)3, s. 82-87.
47. Glad, T., Erään LWC-linjan stabiilisuuden kartoittaminen ja vaihteluiden identifiointi Tapio raina-analysaattoria käyttäen, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo 1992, 169 s.

48. Weissshuhn, E. & Holik, H., The elimination of caliper profile disturbance factors in machine calenders. Eucepa Symposium Control Systems in the Pulp and Paper Industry. Stockholm, May 11-14, 1982. Eucepa, Stockholm, 1982. s. 229-235.
49. Niskanen, J., Nippipaineen tasaisuuteen vaikuttavat tekijät kalanteroitaessa. *Pap. Puu* 78(1996)4, s. 169-171.
50. Munch, E.E. & Schmitz, C.W., How to save filled roll life. Tappi Paper Finishing and Converting Conference. Nashville, Oct 22-25, 1979. TAPPI Press, Atlanta, 1979. s. 99-120.
51. Bartram, E., The Importance of Moisture and Heat In The Calendering of Paper. 1992 Calendering and Winding Short Course. Charlotte, NC, May 3-6, 1992. TAPPI Press, Atlanta, 1992. s. 57-69.
52. Crotagino, R.H., Weiss, G.R., Visentin, J. & Dudas, L., State of the art in calender control. Eucepa Symposium Control Systems in the Pulp and Paper Industry. Stockholm, May 11-14, 1982. Eucepa, Stockholm, 1982. s. 220-228.
53. Knecht, W.E., Cross direction caliper control, what is happening, and how to choose. Integrated Approach to Cross Direction Control...from the Papermakers Point of View. Portland, OR, Oct 11-13, 1994. TAPPI Press, Atlanta, 1994. s. 251-255.
54. Weissshuhn, E. & Holik, H., Kalandersista utpost för att göra bra papper bättre. *Svensk Papperstidn.* 90(1987)6, s. 82-87.
55. Kananen, J., Paperin rakenteen vaikutus kokoonpuristuvuuteen, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo 1999, 109 s. + liitteet.
56. Schaffrath, H.J. & Göttsching, L., The behaviour of paper under compression in z-direction. 1991 International Paper Physics Conference. Kona, Hawaii, Sept 22-26, 1991. TAPPI Press, Atlanta, 1991. Book 2, s. 489-510.
57. Kartovaara, I., Gradienttikalanterointi: gradienttien syntymisen ja kalanterointituloksen arvostelun perusteet, Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo 1989, 140 s.
58. Ting, T.H.D., Johnston, R.E. & Chiu, W.K., Compression of paper in the z-direction – the effects of fibre morphology, wet pressing and refining. 52nd APPITA annual general conference. Brisbane, Australia, May 11-14, 1998. APPITA, Carlton, Australia, 1998. s. 527-534.

59. Jackson, M. & Ekström, L., Studies Concerning the Compressibility of Paper. *Svensk Papperstidn.* 67(1964)29, s. 807-821.
60. Kyllönen, H., Superkalanterin telaprofiilien vaikutus päällystetyn paperin laatuun, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo 1990, 104 s.
61. Parola, M., Kaljunen, T. & Linna, H., The effect of supercalendering on the web tension profile. 1997 Finishing and converting conference and trade fair. Washington, DC, Sept 21-24, 1997. TAPPI Press, Atlanta, 1997. s. 119-125.
62. Daul, M., The influence of deinked fiber to winding of newsprint roll. 1993 Newsprint Forum. Atlanta, GA, Apr 21-23, 1993. TAPPI Press, Atlanta, 1993. 9 s.
63. Löytty, H., Kokoonpuristuva huokoinen paperi. Kirjallisuuskatsaus. Espoo 1998, KCL, PSC Communications 117, 43 s.
64. Pfeiffer, J.D., Measurement of the K_2 factor for paper. *Tappi* 64(1981)4, s. 105-106.
65. Pfeiffer, J.D., Surface winding to overcome the strain deficiency. 1990 Finishing and Converting Conference. Lake Buena Vista, FL, Oct 7-10, 1990. TAPPI Press, Atlanta, 1990. s. 233-236.
66. Kiiskinen, H., Paltakari, J. & Pakarinen, P., Drying and paper quality. Papermaking, Part 2 Drying, Toim. Karlsson, M., Julk. Fapet Oy, Helsinki, 2000, s. 332-368.
67. Parola, M., Vuorinen, S., Beletski, N. & Linna, H., Reologisten ominaisuuksien muodostumismekanismien selvittäminen. Espoo 2000, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tietotekniikka, Loppuraportti 28.08.2000, 40 s.
68. Kniivilä, J., On-line tension profile optimization via moisture profile controls on the newsprint papermaking process. 6th International Conference On Web Handling, IWEB 2001. Stillwater, OK, June 10-13, 2001. Oklahoma State University, Web Handling Research Center, Stillwater, 2001. 12 s.
69. Kinnunen, J., Length and Elasticity Profile Measurements. Metson Paper Oy, sisäinen raportti, 2000 [viitattu 28.08.2000].
70. Lätti, H., Kosteusvaihtelun vaikutukset paperin reologisiin ominaisuuksiin kuivatuksessa, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan osasto, Espoo 2000, 152 s.

71. Niskanen, K. & Kärelampi, P., In-plane tensile properties. Paper Physics, Toim. Gullichsen, J., Paulapuro, H. & Niskanen, K., Julk. Fapet Oy, Helsinki, 1998, s. 138-191.
72. Göttching, L. & Baumgarten, H.L., Triaxial deformation of paper under tensile load. The fundamental properties of paper related to its uses, Transactions of the symposium held at Cambridge Sept. 1973, Toim. Bolam, F., Julk. The British Paper and Board Industry Federation, Technical Division, London, 1976, vol. 1, 227-249.
73. Lif, J.O., Wikström, M., Fellers, C. & Rigdahl, M., Deformation of Paper Structure During Calendering as Measured by Electronic Speckle Photography. J. Pulp Pap. Sci. 23(1997)10, s. J481-J486.
74. Gratton, M.F., 3-D web deformations from calendering in a hard nip. 1996 Finishing and converting conference. Bal Harbor, FL, Oct 6-9, 1996. TAPPI Press, Atlanta, 1996. s. 173-180.
75. Baumgarten, H.L., Changes in web dimensions during machine calendering and supercalendering. UMIST Symposium on calendering and supercalendering. Manchester, Sept 1-2, 1975. University of Manchester Institute of Science & Technology, Manchester, 1975. 17 s. + liitteet.
76. Pfeiffer, J.D., Formulas for calculating roll structure allow prediction of roll defects. TAPPI Paper Finishing and Converting Conference. Nashville, TN, Oct 22-25, 1979. TAPPI Press, Atlanta, 1979. s. 165-172.
77. Hakiel, Z., Nonlinear model for wound roll stresses. Tappi J. 70(1987)5, s. 113-117.
78. Guldenberg, B., Einfluss der nipinduzierten Effekte auf den Wickelprozess von Papier, Väitöskirja. Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Aachen 2000, 168 s.
79. Mustonen, H., Kireysprofiilin mittaus ja hallinta. Helsinki 1996. AEL Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Julkaisu P907902/96XI, Insko-koulutus 10 s.
80. Åkerlund, K., Paperin kireysprofiili pituusleikkurilla, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, Espoo 1994, 99 s.
81. Lindblad, G., THE ULTRASONIC MEASURING TECHNOLOGY – Through the eyes of Lorentzen & Wettre, a tool for Process Control, Trouble Shooting and Quality Control, esite, AB Lorentzen & Wettre, 1999. 85 s.

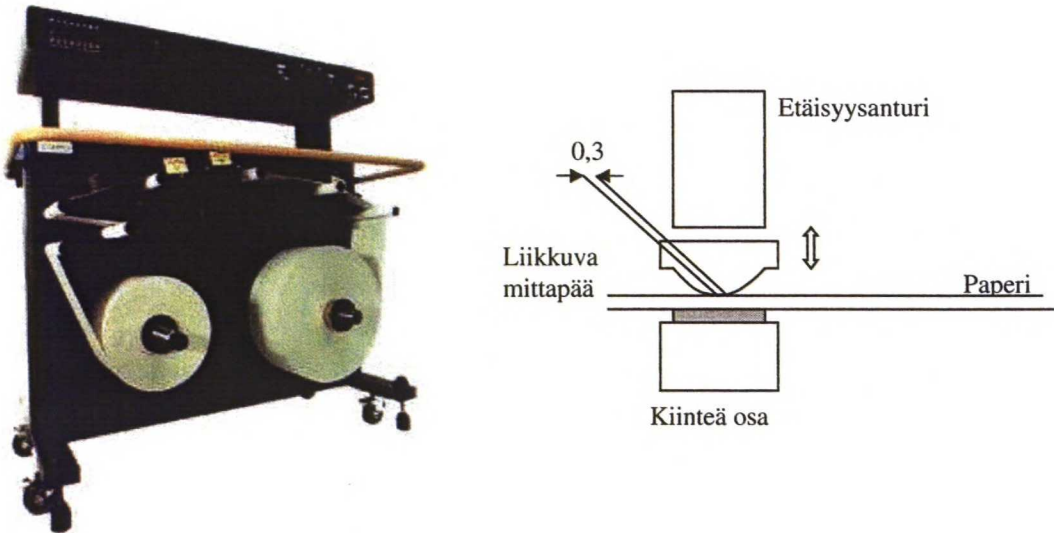
82. Bonazza, L., Automatic Reel Hardness Control With The "Backtender's Friend". CPPA 64th Annual Meeting. Montreal, Feb 2-3, 1978. CPPA, Montreal, 1978. s. B155-B160.
83. Anon., TAPIO[®] Analyzers PMA/TS Profiler/Proma. esite, Tapio Technologies, 2001. 8 s.
84. Anon., L&W Handbook '00, Paper Testing and Process Optimization. AB Lorenzen & Wettre, Stockholm, 1999. 164 s.
85. Anon., PAROtester2 –manuaali, 18 s.
86. Connors, R., Virtanen, J. & Lang, D., Web tension profile measurement: A new window into the papermaking process. Tappi99 – preparing for the next millennium. Atlanta, GA, Mar 1-4, 1999. TAPPI Press, Atlanta, 1999. Volume 3, s. 1553-1561.
87. ThermaCAM SC1000 [online]. Infradex Oy [viitattu 30.11.2001]. Saatavilla [www-muodossa: <URL:http://www.infradex.com/pdf/SC1000.PDF>](http://www.muodossa.com/pdf/SC1000.PDF).

TAPIO-ANALYSAATTORI

Tapio® PMA on Tapio Technologies Oy:n myymä raina-analyssaattori, jolla voidaan mitata kone- ja poikkisuuntaisia näytteitä melko nopeasti suurella resoluutiolla. Laitteesta löytyy tarkempaa teknistä tietoa mm. viitteestä /83/. Tässä työssä laitetta käytettiin yksinomaan poikkisuuntaiseen paperin rakennetutkimukseen.

Laitteen rakenne ja toiminta

Tapio-analyssaattori on esitetty kuvassa 1. Laitteella voidaan mitata paperista neliömassa, paksuus, kiilto, transmissio, tuhka, huokoisuus, remissio ja kuituorientaatio. Lisäksi siihen voidaan asentaa erillinen TPS-painojälkianturi, jolla voidaan mitata painojäljen lisäksi mm. kutistumaprofiilia viiramarkkeerauksesta ja kalanterointimustumaprofiilia. Tässä työssä käytettiin vain neliömassa-, paksuus-, kiilto-, transmissio- ja tuhka-antureita. Lisäksi neliömassa mitattiin kahdella eri anturilla, joista toinen on erityisesti suunniteltu neliömassavanaisuuden havaitsemiseen. Tämän anturin mittausalue on suorakulmainen ja se on mitoiltaan 15 mm * 150 mm (poikkisuunta * konesuunta). Toisen, laitteen mukana yleisesti myytävän anturin mittausalue on puolestaan pyöreä ja sen halkaisija on 5 mm. Tämä pienempi anturi kerää paljon formaatiomittakaavaista vaihtelua, joka on useimmiten täysin epäsäännöllistä. Isommalla anturilla saadaan puolestaan paremmin selville hieman leveämpi stabiili poikkisuunnan vaihtelu. Antureiden toiminta perustuu betasäteilyn vaimenemiseen paperissa.



Kuva 1. Tapio® PMA –analyssaattori ja paksuusanturin periaatekuva /83/.

Tässä yhteydessä on myös syytä mainita mittalaitteen paksuusmittausanturi, joka on esitetty kuvassa 1. Varsinainen mittapää koostuu liikkuvasta puolipallon muotoisesta kärkikappaleesta, jonka etäisyyttä paperin pinnasta mitataan etäisyysanturilla. Paperin vastakkaisella puolella on kiinteä alusta. Koska anturin kosketuspinta paperia vasten on likimain pallon muotoinen ja halkaisijaltaan vain 0,3 mm, se on melko herkkä verrattuna esimerkiksi standardin SCAN-P 7:75 mukaiseen Lorentzen & Wettren mikrometriin, jossa kosketuspinta-ala on pienimmillään 2 cm² /84/. Tapio-analyssaattorin paksuusanturin on todettu mukailevan anturin kärjen muotoilun perusteella paremmin paperin pinnan muotoja.

Poikkiratanäytteiden analysointi tulee suorittaa valmistajan ohjeiden mukaan vähintään 20 arkista riittävän tarkkuuden ja tilastollisesti luotettavan tuloksen varmistamiseksi. Tässä työssä mittauksissa käytettiin 20-30 poikkirata-arkkia. Mittauksista saadut arvot tallentuivat automaattisesti tietokoneelle, jossa niitä voitiin analysoida tarkemmin.

LORENZEN & WETTRE TSO

Paperikoneilta kerätyistä poikkiratanäytteistä mitattiin vetojäykkyyssindeksi (TSI = Tensile Stiffness Index) ja sen orientaatiokulma (TSO = Tensile Stiffness Orientation) Lorentzen & Wettren kehittämällä TSO-mittalaitteella /84/.

Vetojäykkyyden mittaus perustuu ultraäänen etenemiseen paperissa. Sitä kuvataan kaavalla

$$St = k * w * v^2$$

missä

St on vetojäykkyys (N/m),

k on vakio,

v on ultraäänen nopeus (m/s) ja

w on neliöpaino (g/m²).

Vetojäykkyyssindeksi saadaan jakamalla vetojäykkyys mittauskohdan neliöpainolla

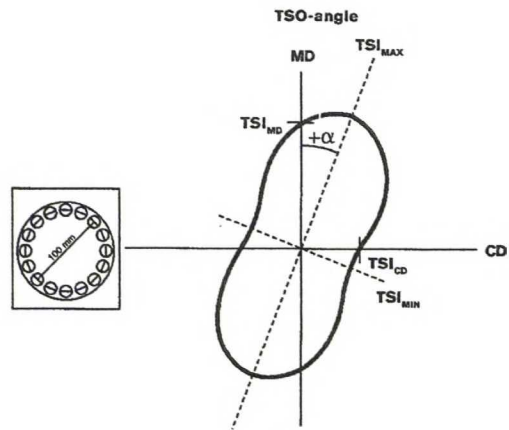
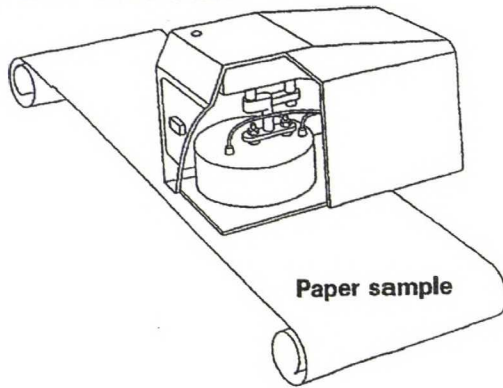
$$TSI = k * v^2$$

missä

TSI on vetojäykkyyssindeksi (kNm/g).

Laite mittaa nopeudet tason eri suunnissa ja laskee näistä nopeuksista vetojäykkyyssindeksit sekä maksimiorientaatio suunnan ja konesuunnan välisen kulman, jota kutsutaan suuntakulmaksi (TSO). Laitteesta saadaan myös poikkisuunnan vetojäykkyyssindeksin avulla laskettu kosteuslaajenema. Seuraavalla sivulla on kuva mittalaitteesta ja sen mittausanturista.

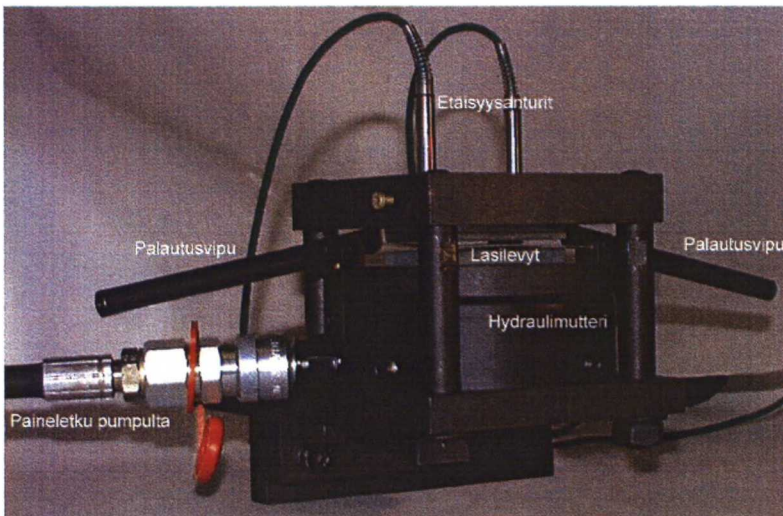
TSO TESTER



Kuva 1. Lorenzen & Wettre TSO –mittalaite ja sen mittausanturi /81, 82/.

KCL-PURRE

KCL-PURRE on Keskuslaboratoriossa kehitetty mittalaite, jolla tutkitaan paperin käyttäytymistä puristuspuheen funktiona. Kuvassa 1 on nähtävissä laitteiston puristuskenno. Laitteistoon kuuluu lisäksi painepumppu ja tietokone. Tässä työssä lasilevyjen sijaan käytettiin metallilevyjä.



Kuva 1. KCL-PURRE:n puristuskenno.

Laitteessa on kaksi erittäin tarkkaa LVDT-etäisyysanturia, jotka mittaavat levyjen välisen etäisyyden. Tulosten laskennassa antureiden lukemista laskettiin keskiarvo, jota käytettiin kokoonpuristuvuuden laskennassa. Tämän johdosta puristuksen epätasaisuus ja antureiden väliset eroavuudet keskiarvoistuvat. Etäisyystietojen lisäksi paineanturi rekisteröi käytettävän puheen ja tiedot siirtyvät mittaustietokoneelle sekunnin välein. Laite on säädetty siten, että alussa puhe nousee hitaammin kuin lopussa. Tämän vuoksi pienillä puheilla saadaan useampi mitta-arvo. Puristettavan alan koko on 55 mm * 55 mm ja suurin saavutettava puhe on 100 bar. Puheen nostaminen tähän arvoon kestää noin 90 sekuntia. Etäisyysanturit kalibroitiin ennen jokaista koepistettä kalvopinojen avulla.

PAROTESTER2 –KOVUUSMITTALAITE

PAROtester2 on sveitsiläisen Proseq SA:n markkinoima mittalaite, joka on suunniteltu mittaamaan paperi-, kelmu- ja filmirullien kovuuksia /85/. Mittaus tapahtuu siten, että jousivoimalla laukaistaan iskuri tarkastettavaan pintaan, josta se sinkoutuu takaisin. Iskurin kumpaankin suuntaan tapahtuva liikenopeus mitataan. Tämä on toteutettu iskurin sisään sijoitetulla magneetilla, joka ohittaa kelan mittauksen aikana. Isku- ja paluuliikkeen aikana indusoituu kelaan jännite, jonka suuruus on riippuvainen iskurin nopeudesta. Mittausarvot muodostuvat isku- ja paluuliikkeen nopeuksista, jotka näyttölaitteessa käsitellään, muodostaen *kovuusarvon* L. Kovuusarvo määritellään seuraavasti /85/:

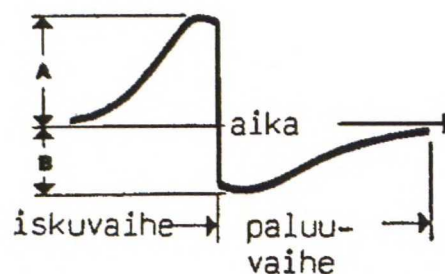
$$L = 1000 * \frac{B}{A} \quad ,$$

missä

A on iskuliikkeen nopeus ja

B on paluuliikkeen nopeus.

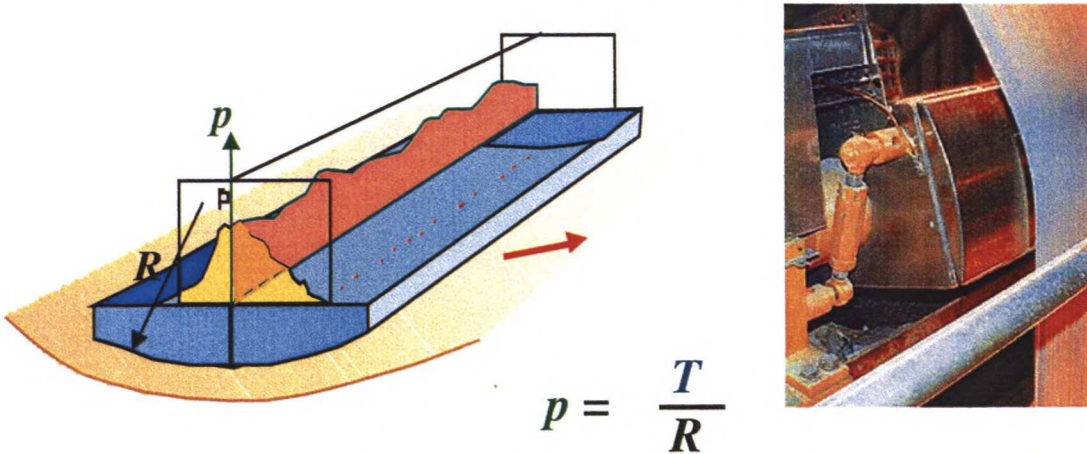
Kovuusarvo on siis suoraan verrannollinen iskurin paluu- ja iskuliikkeen nopeuksien osamäärään. Mittaukset on tehty kuvan 1 kaltaisella mittalaitteella ja samassa yhteydessä on havainnollistettu mittalaitteen rekisteröimä isku- ja paluuliikkeen nopeus.



Kuva 1. Kovuuden mittaus sekä paluu- ja iskuliikkeen nopeuksien määritelmä /85/.

IQTENSION™ –KIREYSMITTAUSPALKKI

Metso Paper Oy:ssä (aikaisemmin Valmet) on kehitetty kireysprofiilia mittaava laite, jonka toiminta perustuu leijuntapaineen mittaamiseen kaarevan telan ja liikkuvan rainan välistä /86/. Mittausperiaate ja laitteen rakenne näkyvät kuvassa 1.



Kuva 1. Kireysmittauksen periaate IQTension™ -mittapalkilla /86/.

Ratakireyden ja listan kaarevuussäteen välille käytetään yhtälöä

$$p = \frac{T}{R} \quad ,$$

missä

p on ilmanpaine mittapalkin ja rainan välissä,

T on ratakireys ja

R on listan kaarevuussäde.

Jotta mittaus onnistuu, on rainan nopeuden oltava riittävän suuri, jotta se pysyy irti palkista. Palkin mittausalueeksi ilmoitetaan 0-2000 N/m ja sen resoluutio on 1 N/m. Mittausjärjestelmä muodostuu mittapalkista, instrumentointikaapista ja tiedonkeruulaitteistosta. Antureiden kalibrointi tapahtuu automaattisesti.

FLIR ThermaCAM SC1000 -LÄMPÖKAMERA

Tässä työssä käytettiin Infradex Oy:n myymää lämpökameramallia FLIR ThermaCAM SC1000, jolla mitattiin lämpötilaprofiileita paperikonelinjan eri kohdista. Laitteen yksityiskohdista kerrotaan mm. viitteessä /87/. Lämpötilamittauksilla pyrittiin tutkimaan, voidaanko konerullaan syntyvä paksuusvana havaita lämpötilaprofiilin avulla.



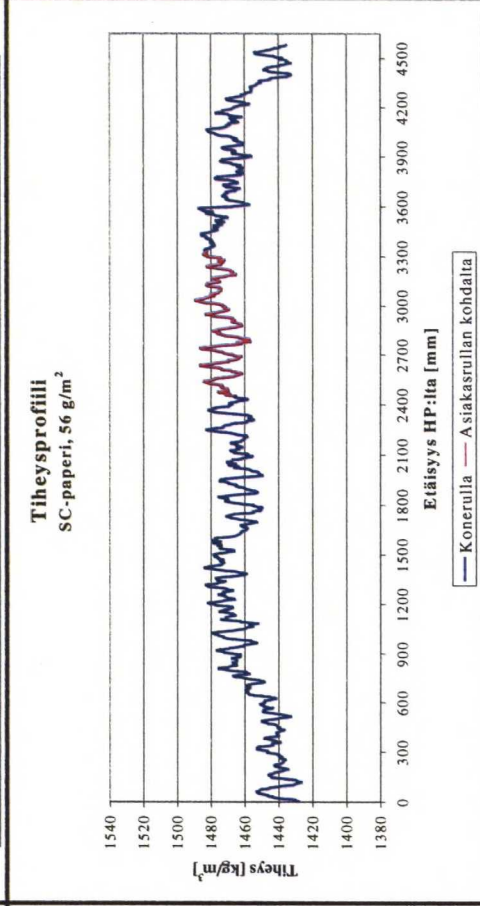
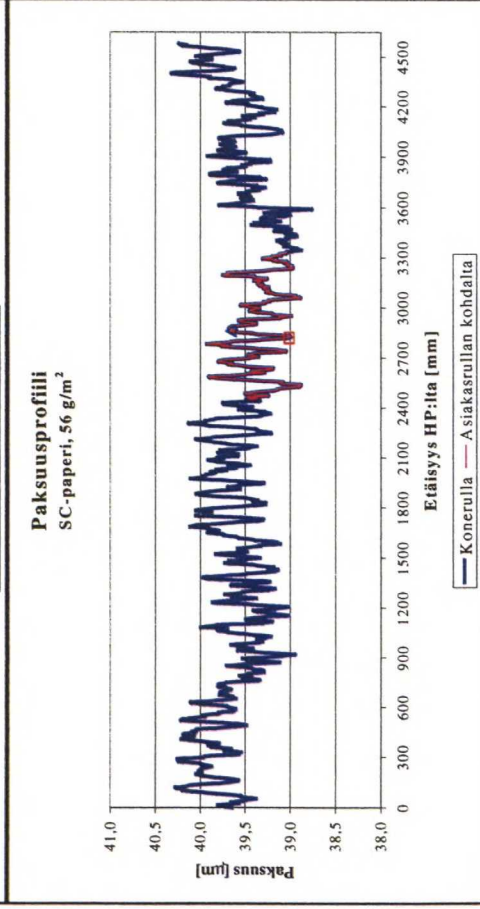
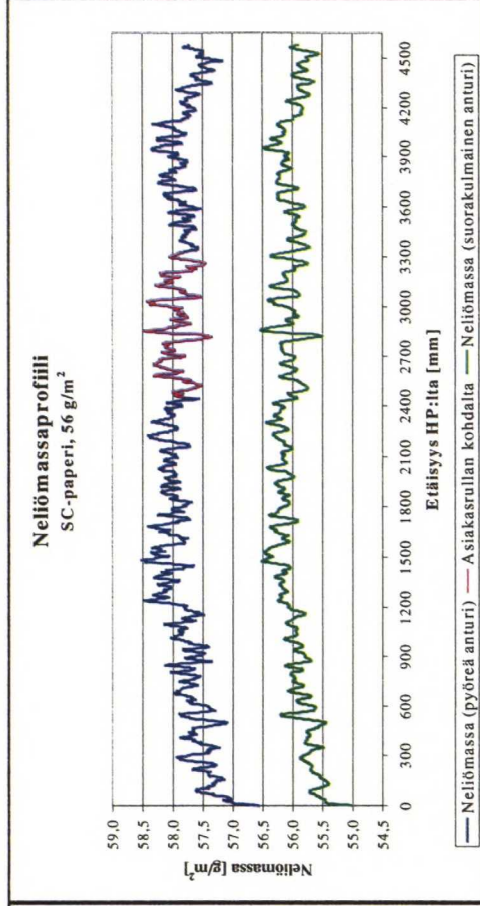
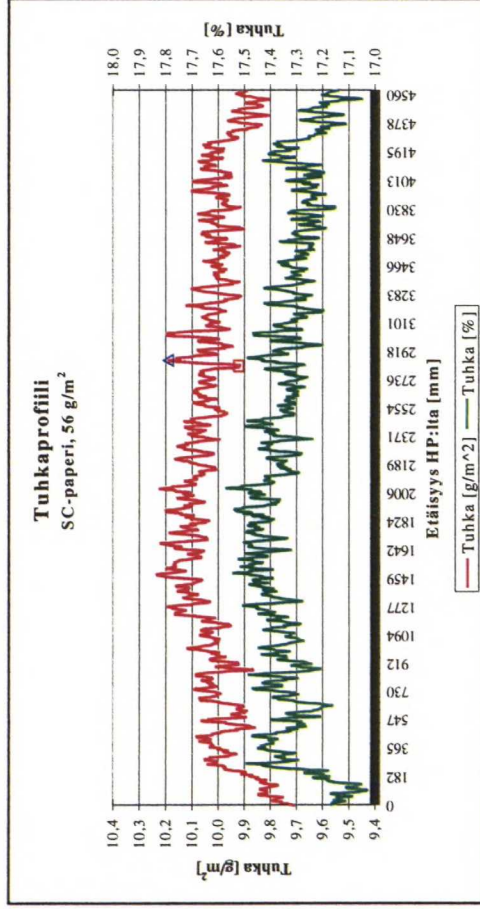
Kuva 1. Työssä käytetty lämpökamera FLIR ThermaCAM SC1000 /87/.

Mittaustarkkuuden ja tilanahtauden vuoksi lämpötilaprofiilimittaus suoritettiin useassa kapeammassa osassa ja jälkikäteen kuvat yhdistettiin lämpökameran mukana tulevan ohjelman avulla yhdeksi kokonaisuudeksi. Kuvien analysointiin on myös saatavilla kehittyneempi ohjelma, jolla voidaan mm. siirtää profiilitieto suoraan kuvista numeerisessa muodossa taulukkolaskentaohjelmaan. Laitteen mittausalue on $-10\text{ °C} - 450\text{ °C}$ ja sen tarkkuus on 2 °C tai 2% riippuen asetetusta mittausalueesta. Lisäksi ympäristöolosuhteiden huomioimiseksi kameraan voidaan syöttää mm. ympäristön lämpötila ja suhteellinen kosteus, joita käytetään mittaustulosten korjaamiseen.

Lämpökameran käyttö vaatii huolellisuutta monien virhelähteiden vuoksi. Olennaista on tuntea mitattavan kohteen emissiviteetti, mutta myös ympäristöolosuhteilla on suuri vaikutus kameran näyttämään. Monet kaasut, kuten vesihöyry ja hiilidioksidi, absorboivat säteilyä aallonpituusalueella ($1-3\text{ }\mu\text{m}$), jolla lämpökamera toimii. Tämän lisäksi mittausta saattavat häiritä ulkopuoliset säteilylähteet.

ESIKOKEIDEN TULOKSIA, TAPIO-analysaattori, SC-paperi 56 g/m²

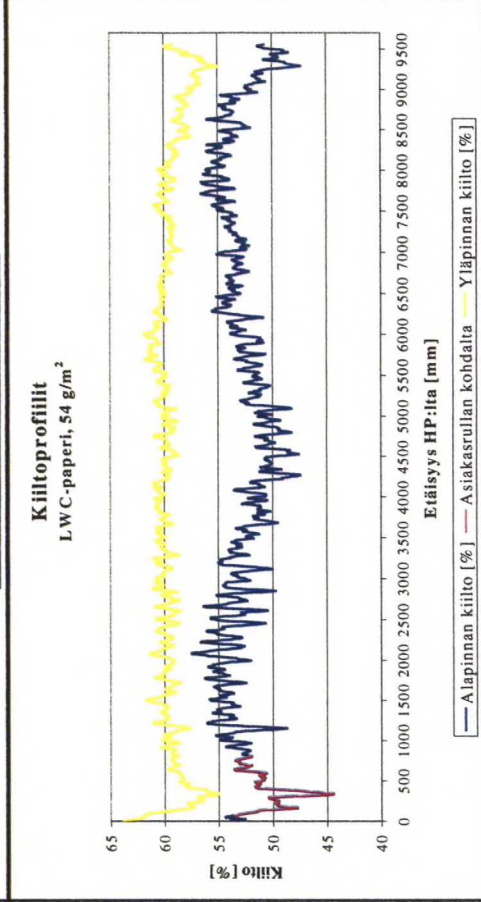
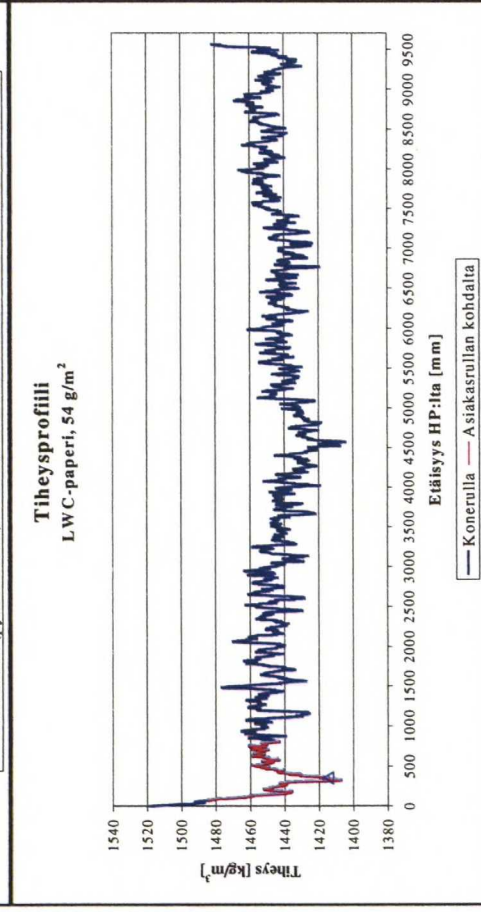
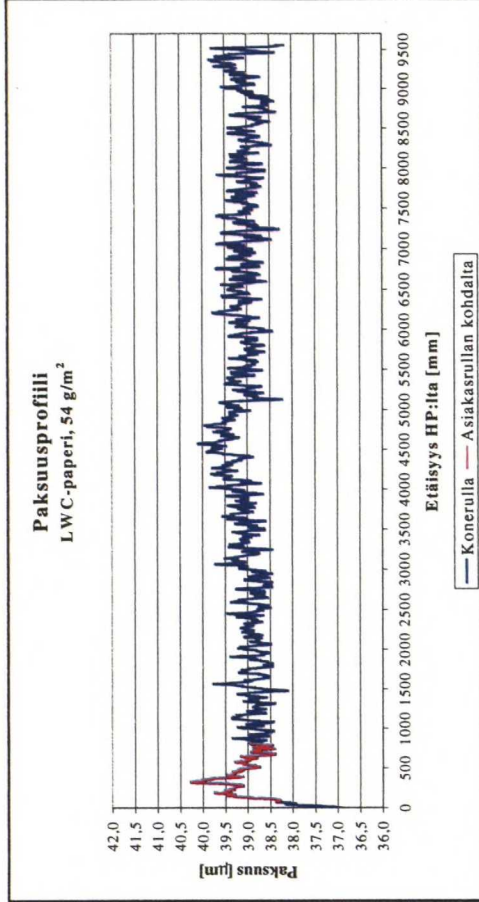
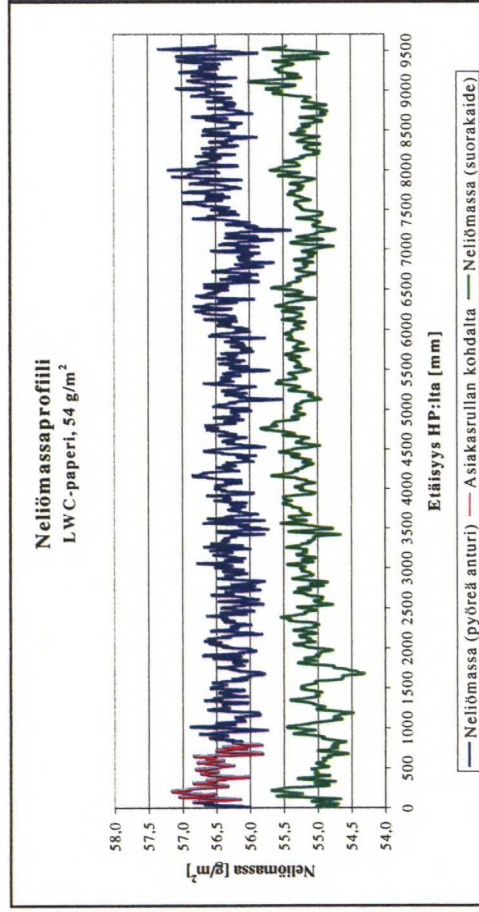
LIITE 7 1(1)



□ = kuoppa, Δ = patti, HP = koneen hoitopuoli eli etureuna. Thiheyden laskennassa käytetty pyöreän neliömassa-anturin tuloksia.

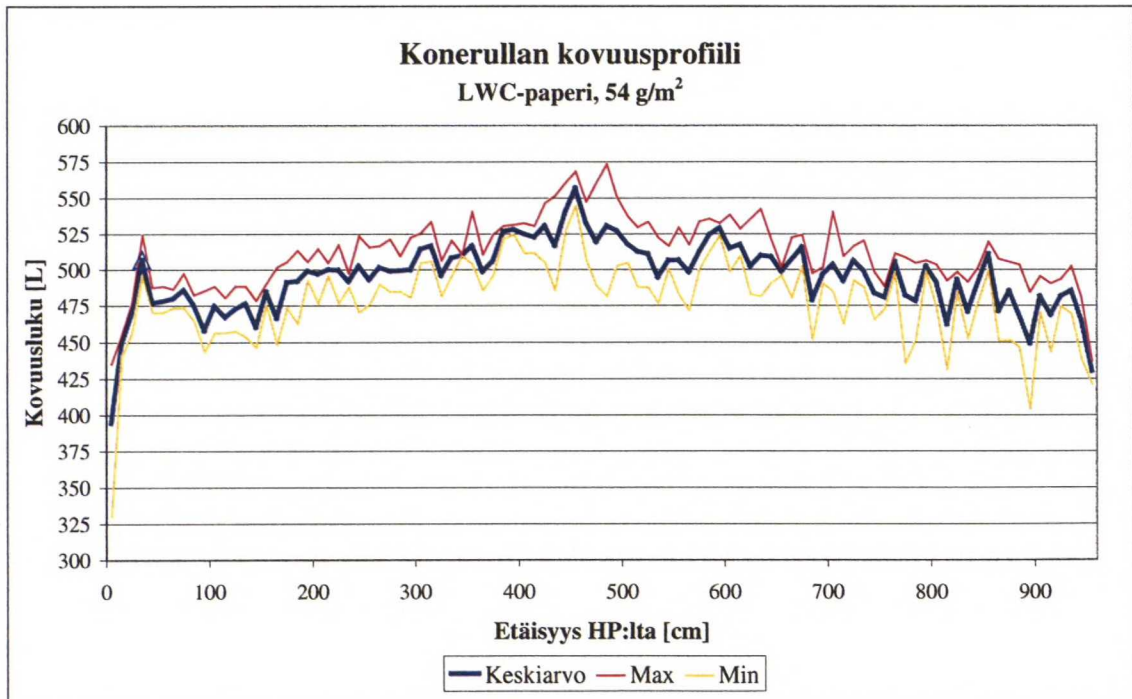
ESIKOKEIDEN TULOKSIA, TAPIO-analysaattori, LWC-paperi 54 g/m²

LIITE 8 1(1)



Δ = patti, HP = koneen hoitopuoli eli etureuna. Tiheyden laskennassa käytetty pyöreän neliömassa-anturin tuloksia.

ESIKOKEIDEN TULOKSIA, KOVUUSPROFIILIT



MÄÄRITYKSET KAPEISTA RULLISTA

LIIITE 10 1(3)

Mittausluoket ja laskennallinen rullan tiheys

SC, 56 g/m²

Sijainti HP:ltä [mm]	Rullan paino [g]	Rullan halkaisija [m]	Hälysyn paino [g]	Hälysyn halkaisija [m]	Rullan leveys [m]	Rullan pituus [m]	Neliömassa [g/m ²]	Rullan tiheys [kg/m ³]
2843 (patti/kuoppa)	7100	0,505	78	0,101	0,03	4213	55,56	1217
2715 (referenssi)	7150	0,505	78	0,101	0,03	4213	55,95	1226

LWC, 54 g/m²

Sijainti HP:ltä [mm]	Rullan paino [g]	Rullan halkaisija [m]	Hälysyn paino [g]	Hälysyn halkaisija [m]	Rullan leveys [m]	Rullan pituus [m]	Neliömassa [g/m ²]	Rullan tiheys [kg/m ³]
365 (patti)	6990	0,600	78	0,101	0,03	4184	55,07	839
235 (referenssi)	7030	0,599	78	0,101	0,03	4184	55,39	846

Laskennallinen pituus

SC-rulla	Patti/Kuoppa	Virhe	Referenssikohia	Virhe	Ero, absoluuttinen	Ero [%]	Virhe
Pituus [m]	4168		91	4202	80	-34	-0,81
Neliömassa, Taplo [g/m ²]	56,16		0,20	56,10	0,04	0,06	0,11
Rullan paino [g]	7100		10	7150	10	-50	-0,70
Hälysyn paino [g]	78		2	78	2	0	0
Rullan leveys [m]	0,030		0,0005	0,030	0,0005	0	0

LWC-rulla

Patti	Virhe	Referenssikohia	Virhe	Ero, absoluuttinen	Ero [%]	Virhe
Pituus [m]	4173		79	4169	80	0,09
Neliömassa, Taplo [g/m ²]	55,21		0,03	55,58	0,05	-0,67
Rullan paino [g]	6990		10	7030	10	-40
Hälysyn paino [g]	78		2	78	2	0
Rullan leveys [m]	0,030		0,0005	0,030	0,0005	0

Laskennallinen neliömassa

SC-rulla	Patti/Kuoppa	Virhe	Referenssikohia	Virhe
Neliömassa [g/m ²]	55,56		1,03	55,95
Rullan paino [g]	7100		10	7150
Hälysyn paino [g]	78		2	78
Rullan pituus [m]	4213		1	4213
Rullan leveys [m]	0,030		0,0005	0,030

LWC-rulla

Patti	Virhe	Referenssikohia	Virhe
Neliömassa [g/m ²]	55,07		1,03
Rullan paino [g]	6990		10
Hälysyn paino [g]	78		2
Rullan pituus [m]	4184		1
Rullan leveys [m]	0,030		0,0005

LASKENNALLINEN NELIÖMASSA JA TIHEYS

Kapeista rullista laskettiin paperin neliömassa seuraavalla kaavalla:

$$bw = \frac{(W_r - W_h)}{b * l} \quad , \quad (1)$$

missä

- bw on neliömassa,
- W_r on koko rullan paino,
- W_h on hylsyn paino,
- b on rullan leveys ja
- l on rullan pituus.

Esimerkiksi SC-paperilla (56 g/m^2) pattikohdassa 2843 mm etureunasta neliömassa on

$$\frac{(7100\text{g} - 78\text{g})}{0,030\text{m} * 4213\text{m}} = 55,56\text{g} / \text{m}^2 .$$

Tiheys laskettiin seuraavasti:

$$d = \frac{\left(\frac{W_r}{1000} - \frac{W_h}{1000} \right)}{\left(b * \left(\frac{\pi}{4} (D_r^2 - D_h^2) \right) \right)} \quad , \quad (2)$$

missä

- d on tiheys,
- D_r on rullan halkaisija ja
- D_h on hylsyn halkaisija.

Esimerkiksi SC-paperilla (56 g/m^2) pattikohdassa 2843 mm etureunasta rullan tiheys on

$$\frac{\left(\frac{7100 \text{ g}}{1000} - \frac{78 \text{ g}}{1000} \right)}{\left(0,03 \text{ m} * \left(\frac{\pi}{4} (0,505^2 - 0,101^2) \text{ m}^2 \right) \right)} = 1217 \text{ kg/m}^3.$$

Laskennallinen pituus määritettiin samalla kaavalla kuin laskennallinen neliömassa.

Pituuden laskennassa käytettiin neliömassa-arvona Tapio-analysaattorista saatua neliömassaa.

Pituuden virhe laskettiin kaavan (1) kokonaisdifferentiaalista (b ja l vaihtavat paikkaa) seuraavalla tavalla:

$$\Delta l = \left| \frac{1}{b * bw} \right| \Delta W_r + \left| \frac{1}{b * bw} \right| \Delta W_h + \left| \frac{W_r - W_h}{b^2 * bw} \right| \Delta b + \left| \frac{W_r - W_h}{b * bw^2} \right| \Delta bw.$$

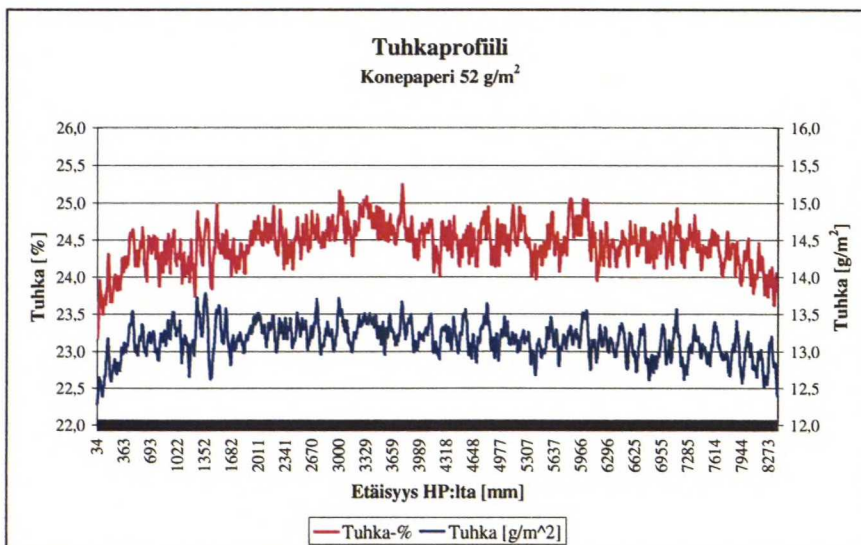
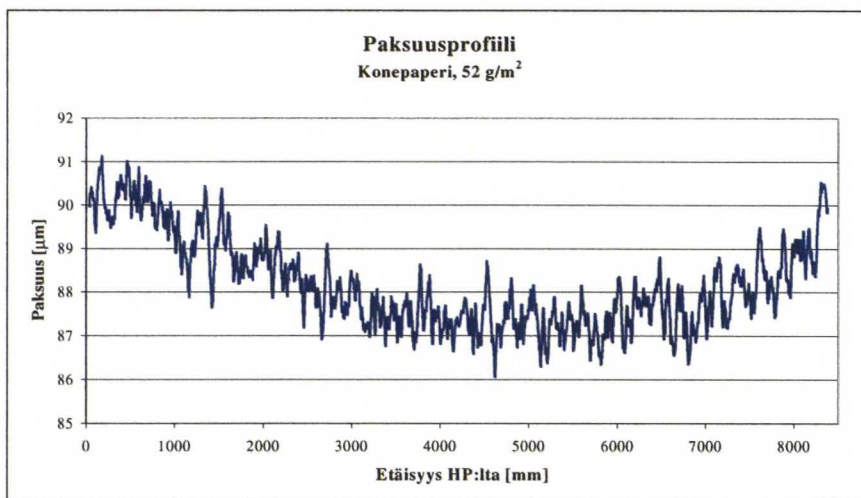
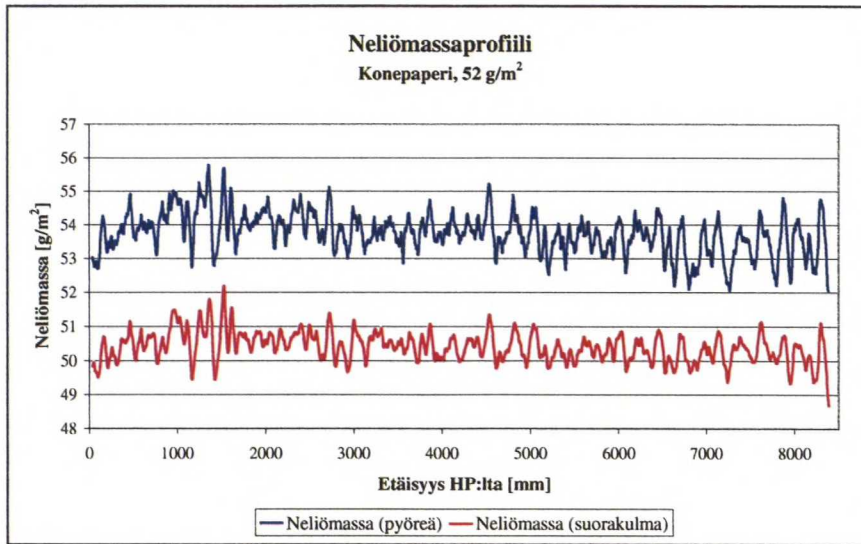
Esimerkiksi SC-paperilla (56 g/m^2) pattikohdassa 2843 mm etureunasta rullan laskennallisen pituuden virhe on

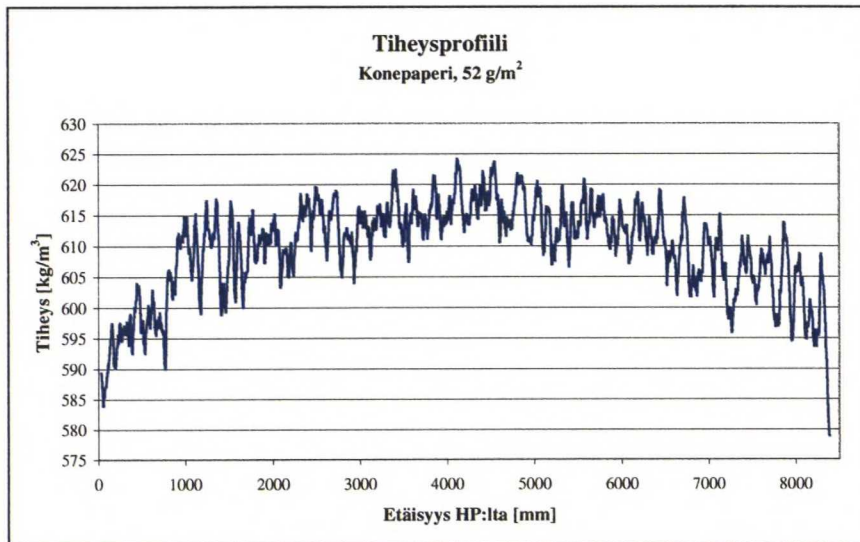
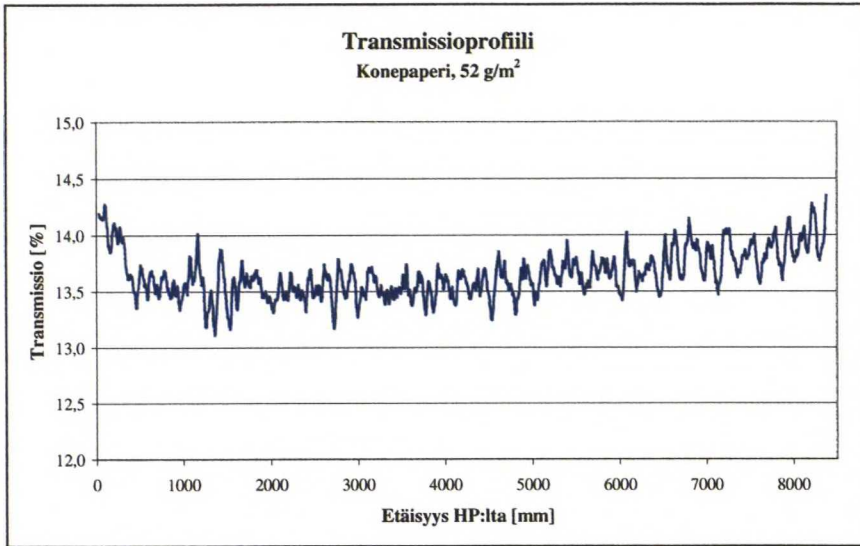
$$\left| \frac{1}{0,03 * 56,16} \right| * 10 + \left| \frac{1}{0,03 * 56,16} \right| * 2 + \left| \frac{7100 - 78}{0,03^2 * 56,16} \right| * 0,0005 + \left| \frac{7100 - 78}{0,03 * 56,16^2} \right| * 0,2$$

$$= 5,94 + 1,19 + \underline{69,46} + 14,84 = 91 \text{ m}.$$

Tästä nähdään, että suurin virhelähde laskennallisen pituuden määrittämisessä oli kiekon leveys, jonka osuus kokonaisvirheestä on noin 76 %.

Tapio-analysaattorilla mitattuja profiileja, Konepaperi, 52 g/m²





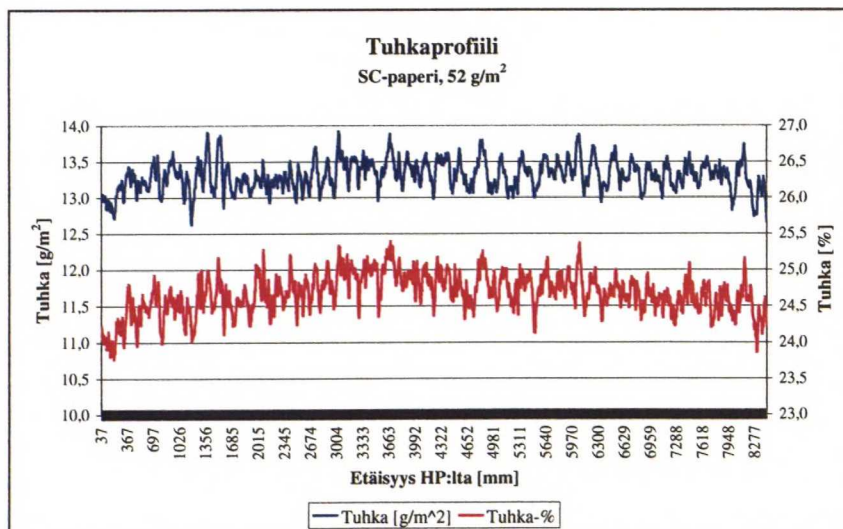
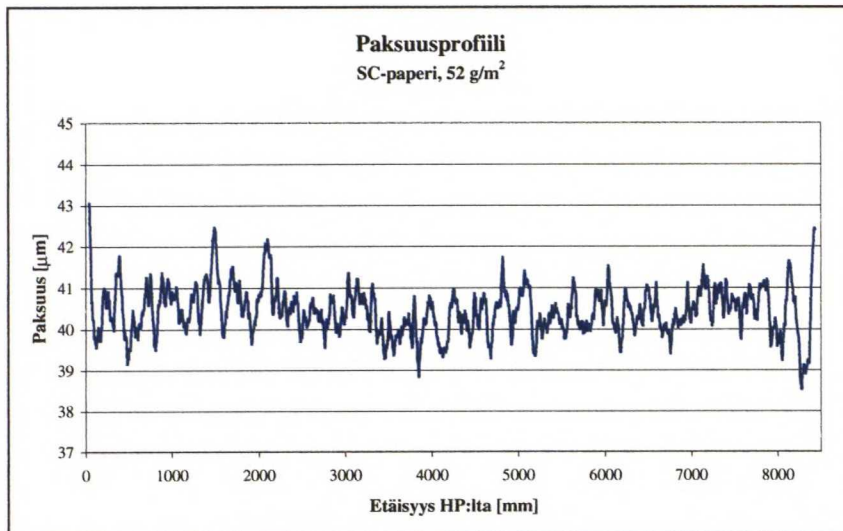
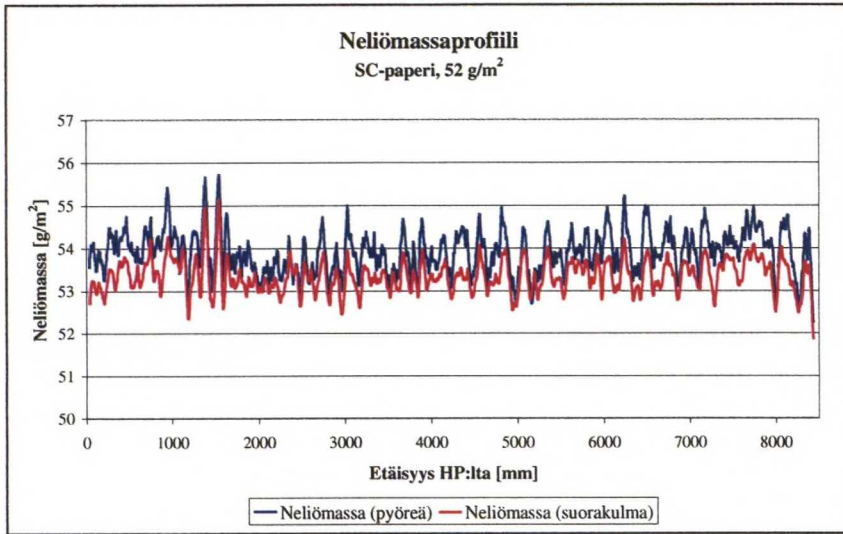
Koko profiilin korrelaatiot konepaperissa

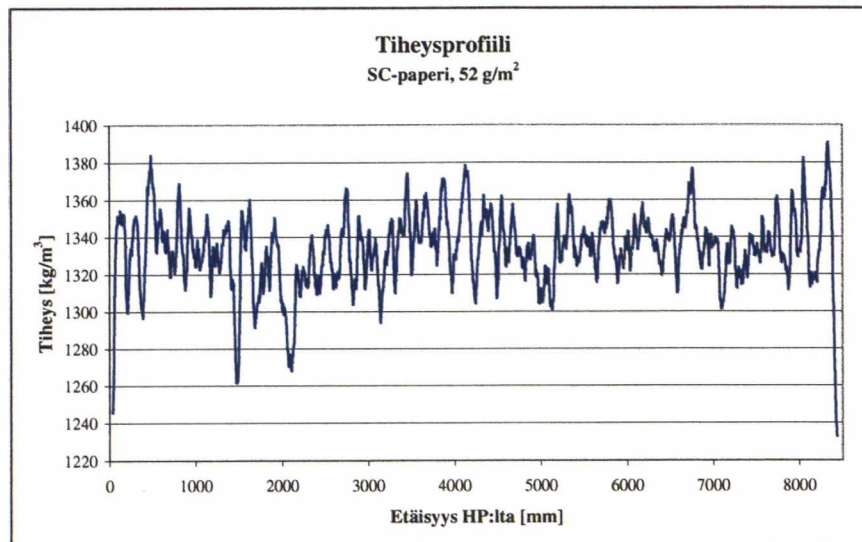
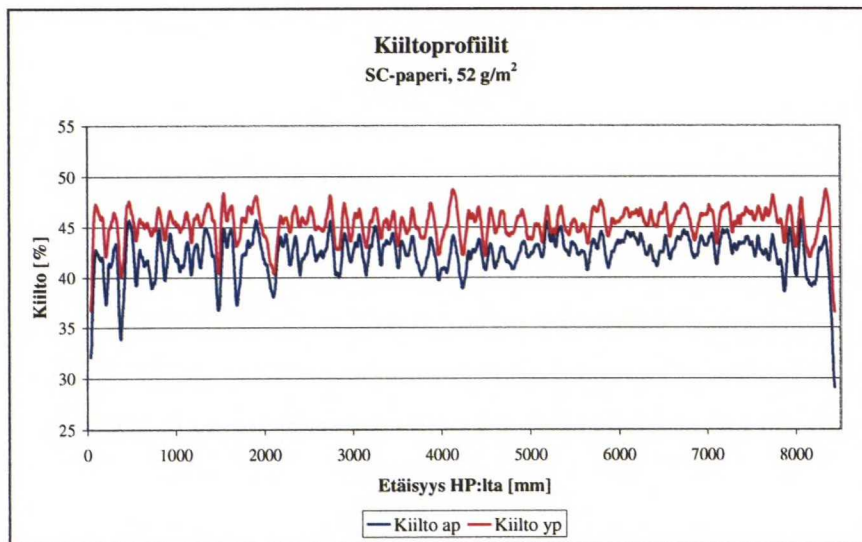
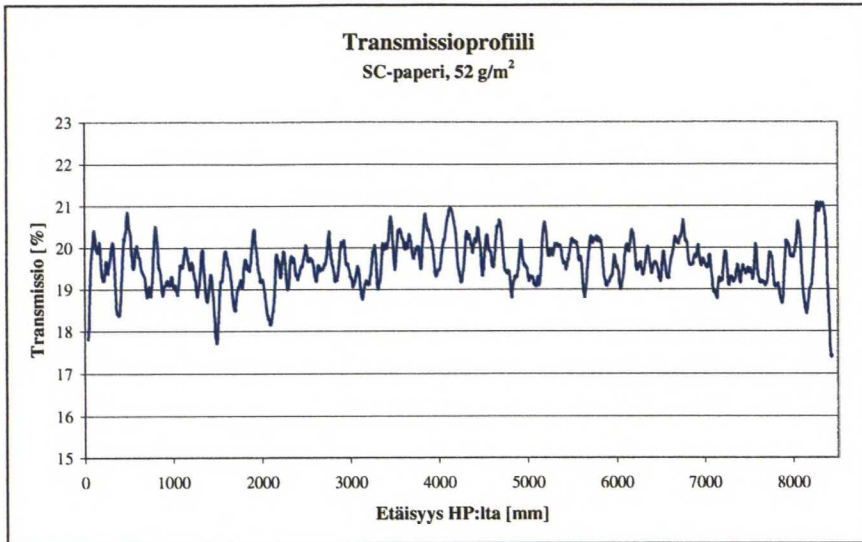
	Tuhka	Tuhka-%	Neliömassa1 (pyöreä)	Neliömassa2	Paksuus	Kiilto1 ap	Kiilto2 yp	Transmissio	Tiheys
Tuhka	1								
Tuhka-%	0,77	1							
Neliömassa1 (pyöreä)	0,76	0,18	1						
Neliömassa2	0,79	0,33	0,88	1					
Paksuus	0,05	-0,35	0,44	0,36	1				
Kiilto1 ap	0,52	0,38	0,41	0,33	-0,48	1			
Kiilto2 yp	0,45	0,50	0,20	0,16	-0,68	0,90	1		
Transmissio	-0,92	-0,60	-0,82	-0,80	-0,10	-0,55	-0,49	1	
Tiheys	0,65	0,50	0,49	0,46	-0,57	0,84	0,84	-0,65	1

Pattikohdan (1000 - 2000 mm etureunasta) korrelaatiot konepaperissa

	Tuhka	Tuhka-%	Neliömassa1 (pyöreä)	Neliömassa2	Paksuus	Kiilto1 ap	Kiilto2 yp	Transmissio	Tiheys
Tuhka	1								
Tuhka-%	0,80	1							
Neliömassa1 (pyöreä)	0,87	0,40	1						
Neliömassa2	0,83	0,45	0,90	1					
Paksuus	0,84	0,53	0,84	0,78	1				
Kiilto1 ap	0,51	0,18	0,63	0,56	0,32	1			
Kiilto2 yp	0,33	0,21	0,34	0,39	0,05	0,72	1		
Transmissio	-0,95	-0,68	-0,89	-0,85	-0,85	-0,49	-0,29	1	
Tiheys	0,68	0,19	0,88	0,77	0,49	0,74	0,51	-0,70	1

Tapio-analysaattorilla mitattuja profiileja, SC-paperi, 52 g/m²





LIITE 11 5(5)

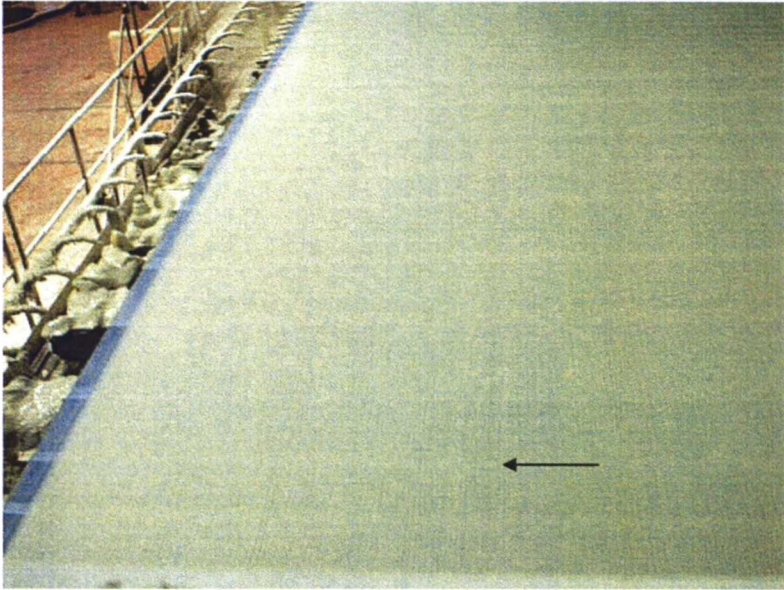
Koko profiilin korrelaatiot SC-paperissa

	Tuhka-%	Tuhka	Transmissio	Paksuus	Neliömassa1 (pyöreä)	Neliömassa2	Kiilto1_ap	Kiilto2_yp	Tiheys
Tuhka-%	1								
Tuhka	0,81	1							
Transmissio	-0,10	-0,15	1						
Paksuus	0,14	0,27	-0,94	1					
Neliömassa1 (pyöreä)	0,17	0,72	-0,13	0,29	1				
Neliömassa2	0,26	0,70	-0,08	0,20	0,86	1			
Kiilto1_alapinta (ap)	0,10	0,24	0,62	-0,53	0,28	0,29	1		
Kiilto2_yläpinta (yp)	0,01	0,27	0,63	-0,52	0,45	0,46	0,86	1	
Tiheys	-0,03	0,19	0,83	-0,79	0,35	0,35	0,69	0,79	1

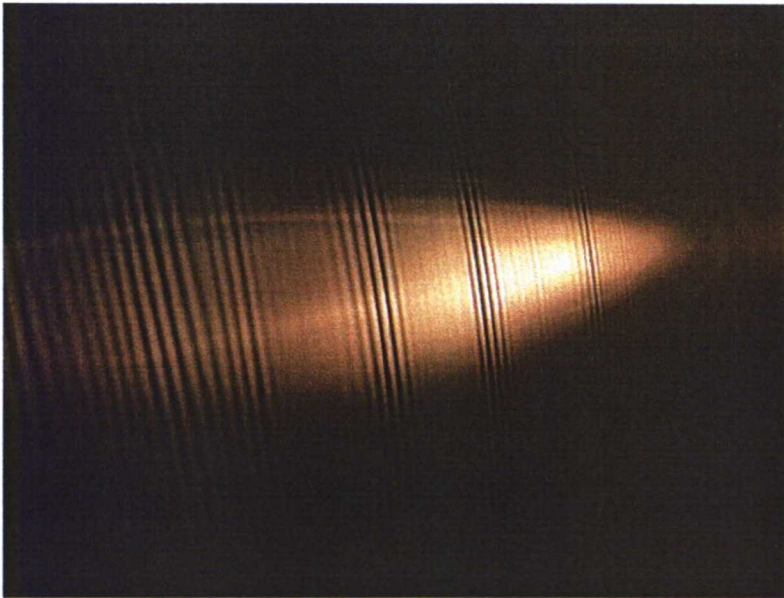
Pattikohdan (1000 - 2000 mm etureunasta) korrelaatiot SC-paperissa

	Tuhka-%	Tuhka	Transmissio	Paksuus	Neliömassa1 (pyöreä)	Neliömassa2	Kiilto1_ap	Kiilto2_yp	Tiheys
Tuhka-%	1								
Tuhka	0,84	1							
Transmissio	-0,40	-0,32	1						
Paksuus	0,44	0,40	-0,95	1					
Neliömassa1 (pyöreä)	0,50	0,89	-0,17	0,27	1				
Neliömassa2	0,52	0,86	-0,21	0,28	0,93	1			
Kiilto1_alapinta	0,12	0,30	0,76	-0,65	0,38	0,28	1		
Kiilto2_yläpinta	0,14	0,42	0,66	-0,52	0,55	0,45	0,92	1	
Tiheys	-0,02	0,30	0,72	-0,70	0,50	0,44	0,87	0,87	1

KUVIA VANASTA



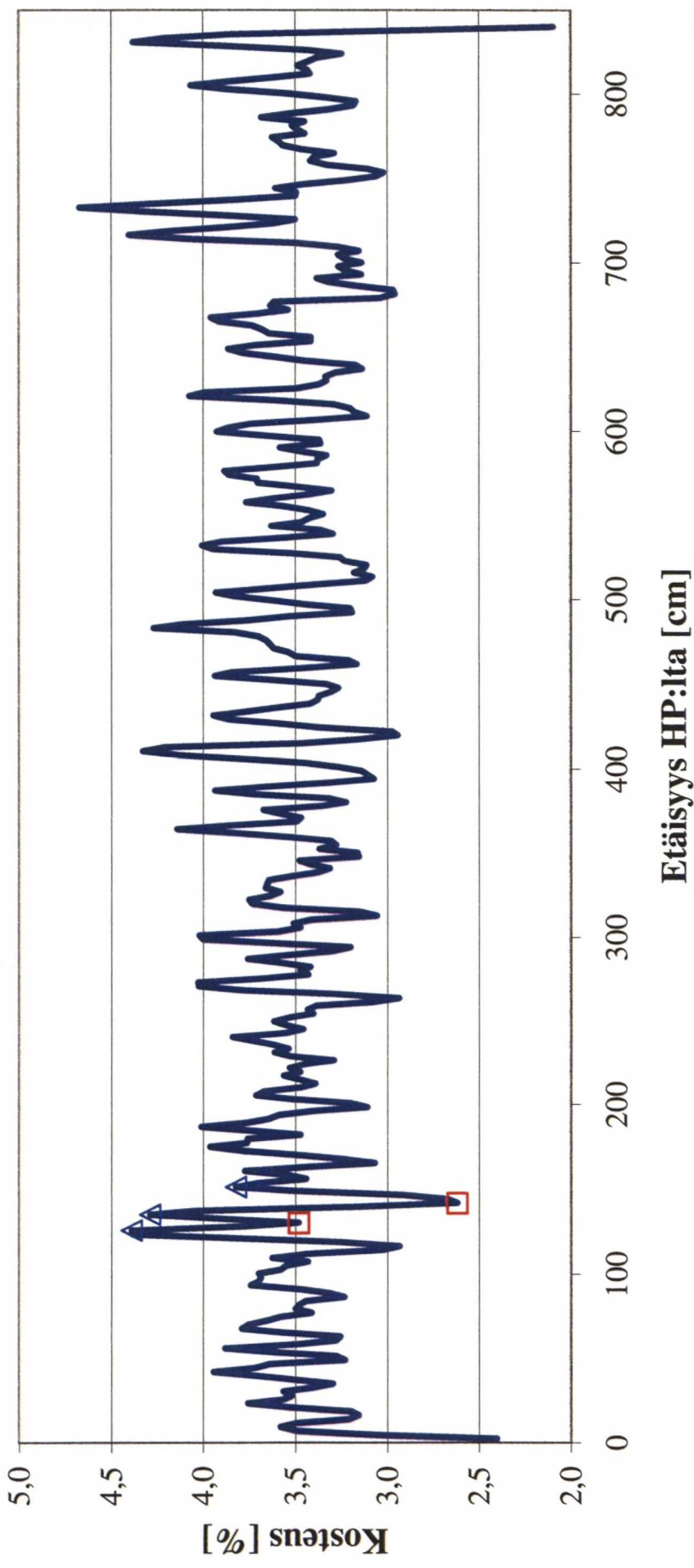
Perälaatikon päältä



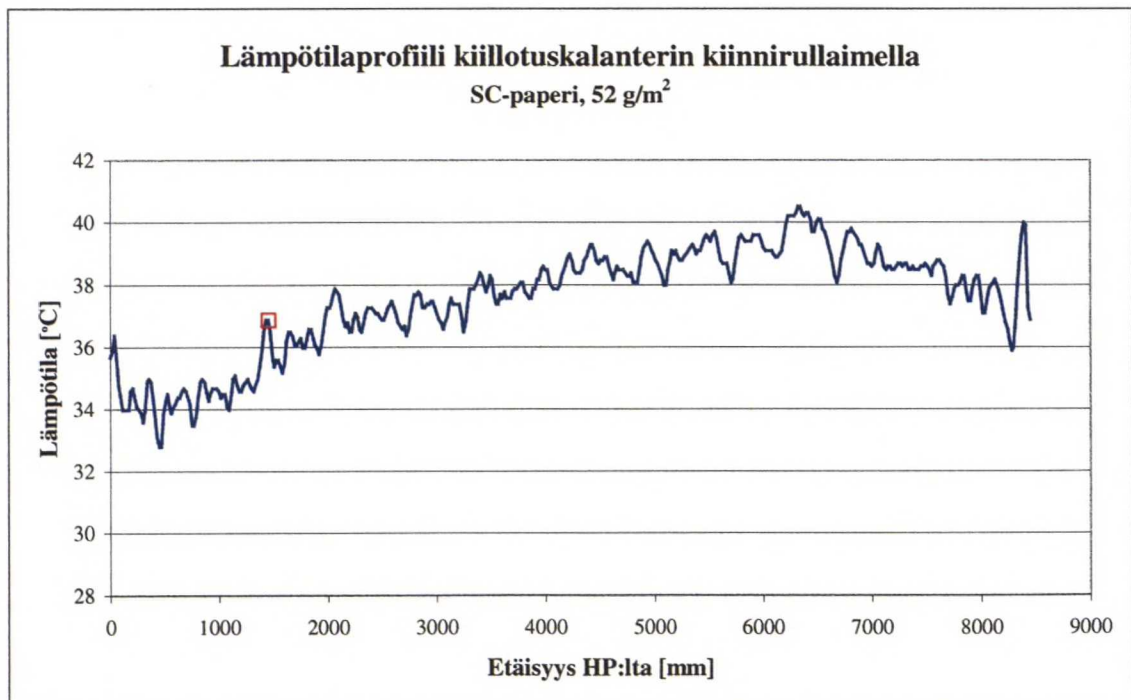
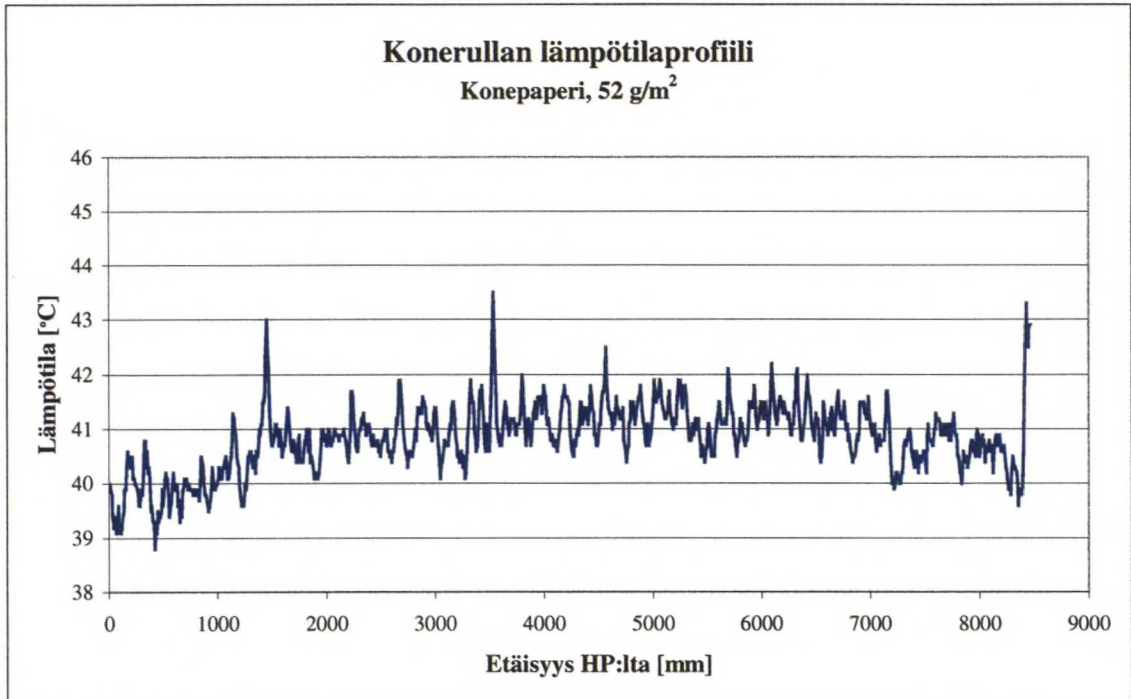
Paperikoneen kiinnirullaimelta

Konepaperin kosteusprofiili ennen kostutusta

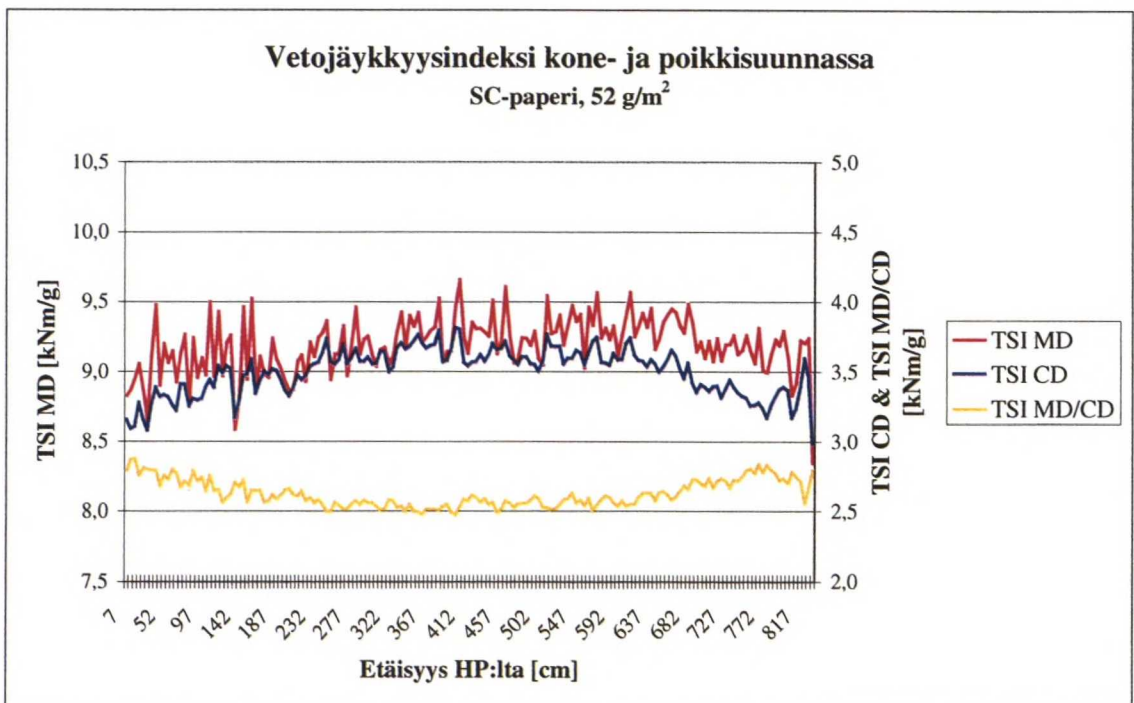
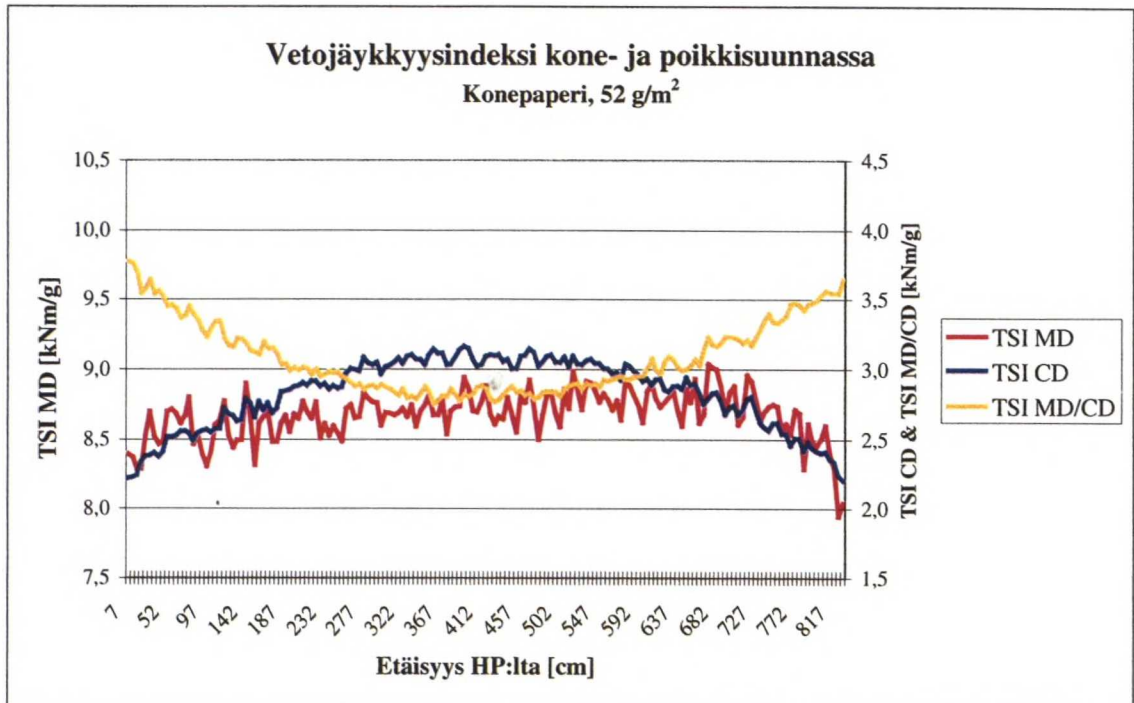
SC-paperi, 52 g/m²

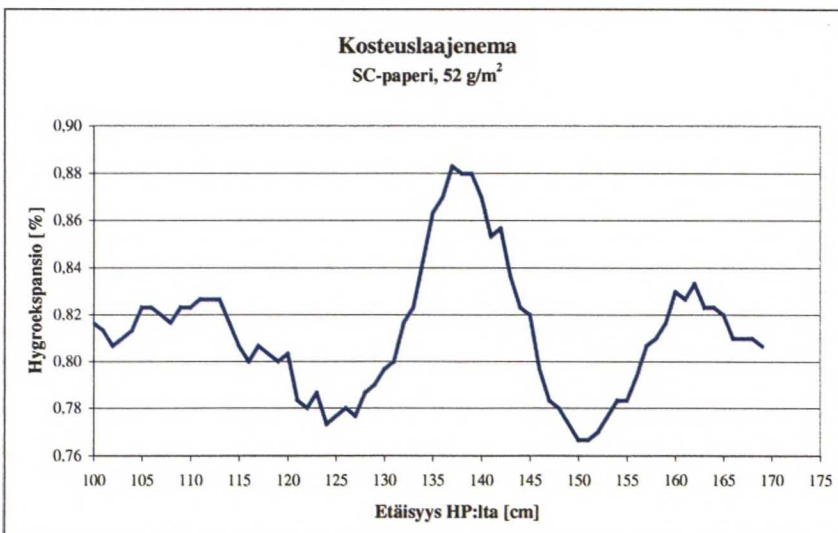
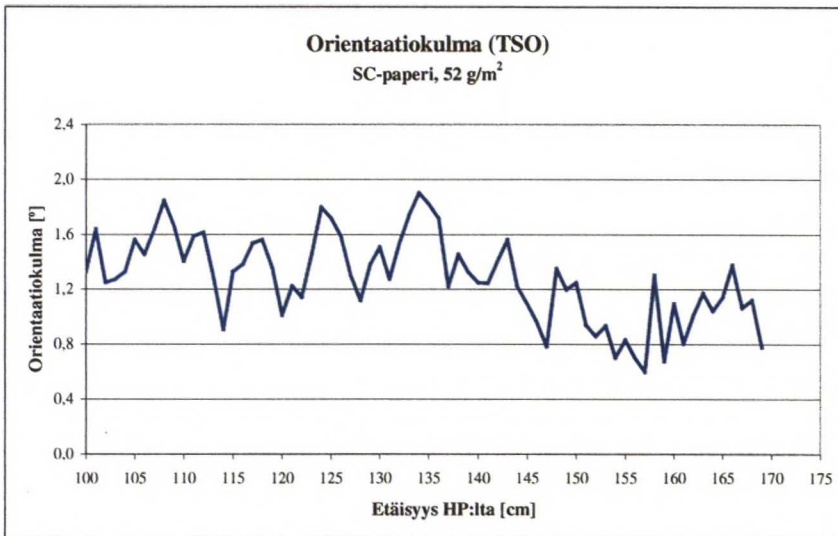
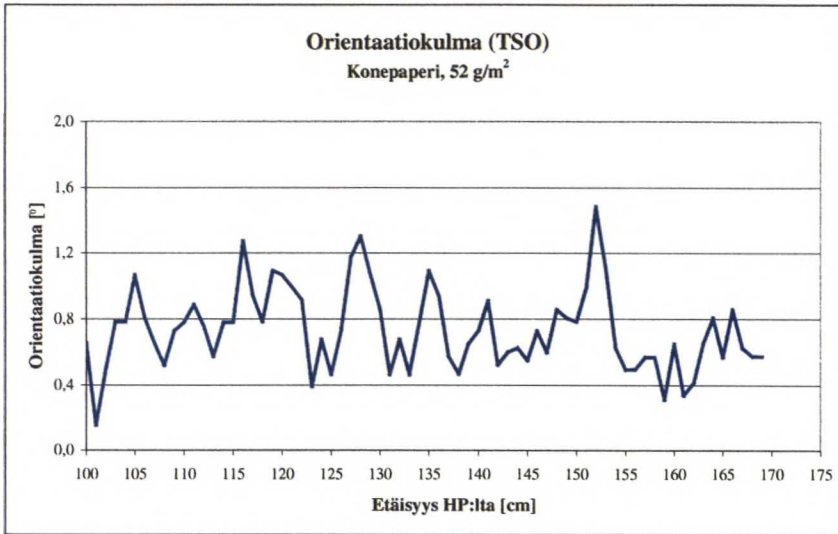


LÄMPÖTILAPROFIILIT

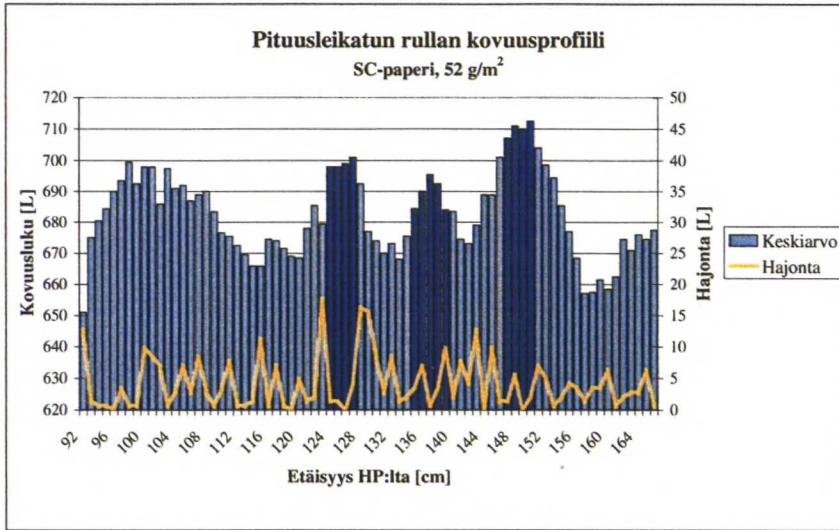


VETOJÄYKKYYSINDEKSI (TSI), SEN ORIENTAATIOKULMA (TSO) JA KOSTEUSLAAJENEMA

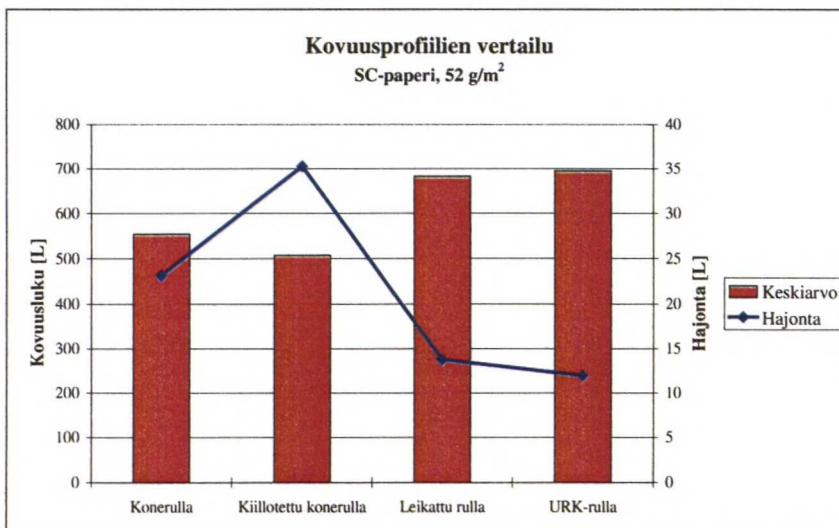
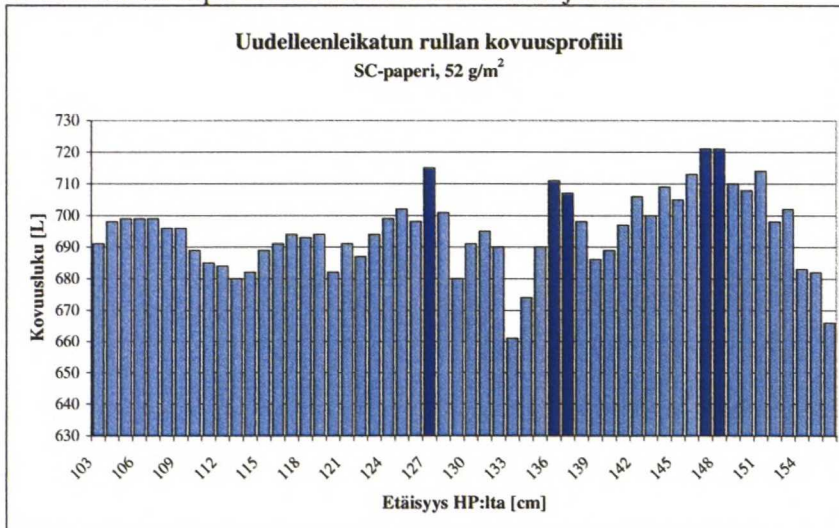




RULLAN KOVUUS



Tummansiniset tolpat osoittavat suuremman halkaisijan kohtia.



KOKOONPURISTUVUUS

Pfeifferin mallin parametrit eri koepisteissä

	K1 [bar]	95-% LV	K2	95-% LV
PE-1	19,9	0,6	5,2	0,1
R1E-1	19,6	0,4	5,2	0,0
R2E-1	21,3	0,7	5,1	0,1
PE-5	24,2	1,1	12,8	0,4
R1E-5	20,7	1,0	13,8	0,3
R2E-5	23,3	1,8	12,5	0,9
PK	20,9	0,7	17,9	0,4
R1K	22,1	0,5	17,2	0,3
R2K	18,7	1,0	18,8	0,4

Mallinmukainen kokoonpuristuma ja z-suunnan kimmokerroin kohdassa p = 1,75 bar
p 1,75

	Kokoonpuristuvuus [%]	Kimmokerroin, E [bar]
PE-1	1,62	112
R1E-1	1,64	111
R2E-1	1,55	117
PE-5	0,55	332
R1E-5	0,59	309
R2E-5	0,58	312
PK	0,45	406
R1K	0,44	411
R2K	0,47	385

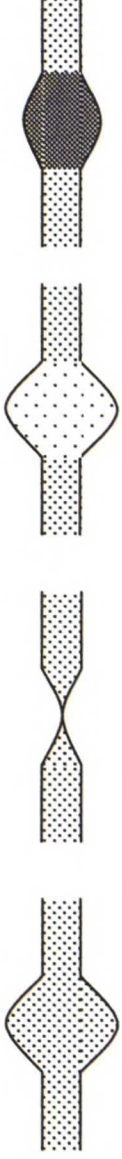
Mallinmukainen kokoonpuristuma ja z-suunnan kimmokerroin kohdassa p = 40 bar
p 40

	Kokoonpuristuvuus [%]	Kimmokerroin, E [bar]
PE-1	21,2	311
R1E-1	21,3	311
R2E-1	20,7	313
PE-5	7,6	821
R1E-5	7,8	835
R2E-5	8,0	789
PK	6,0	1090
R1K	6,0	1069
R2K	6,1	1105

Koepisteiden nimeäminen: näytteen koodi = R1, R2, P. Kalanteroimaton = E, Kalanteroitu = K, puristuksen numero = -1, -2, -3, -4, -5. R1 tarkoittaa referenssipistettä 1 m etureunasta, R2 referenssipistettä 1,92 m etureunasta ja P on kohdasta patti 2. Esimerkiksi PE-1 tarkoittaa pattikohtaa, jonka kohdalta on otettu konepaperista näyte, jota on puristettu yhden kerran.

HALKAISIJA VAIHTELUIHIN JOHTAVAT POIKKEAMAT PAPERISSA

Kuviossa esitetään erisuuntaisten neliömassa- ja tiheyspoikkeamien vaikutussuuntia ja voimakkuuksia, joita eri suureita mittaamalla voidaan havaita. Tiheysvirhe 2 on seurausta neliömassavirheestä 1, kun paperi on kalanteroitu.



	Neliömassavirhe 1	Neliömassavirhe 2	Tiheysvirhe 1	Tiheysvirhe 2
	Kalanteroitamaton	Kalanteroitu	Kalanteroitu	Kalanteroitu
Neliömassa	↑	↓		↑
Paksuus	↑	↓	↑	
Tiheys			↓	↑
Transmissio	↓	↑		
Kiilto			↓	↑
Lämpötila		↑	↑	
Kosteus		↓	↓	
Kireys leikkurilla		↑	↑	
Rullan kovuus	↑	↓	↑	↑

HUOM! Kullakin suureella voi olla poikki-, pituus- ja paksuussuuntainen profiilinsa, jotka vaihtelevat ajan mukana.

PKP - 02

~~TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Puhtaus- ja ympäristökeskus
Kivikko~~