

Marko Juntunen

3D-KOMPENSOINTIHIONNAN VAIKUTUS VASTATELOJEN LAATUUN

3D-KOMPENSOINTIHIONNAN VAIKUTUS VASTATELOJEN LAATUUN

Marko Juntunen
Opinnäytetyö
Kevät 2012
Kone- ja tuotantotekniikka
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty Oulussa vuonna 2012 Efora Oy:lle ja StoraEnso Oyj:lle. Opinnäytetyön valvojana toimi DI Matti Broström Oulun seudun ammattikorkeakoulusta. Työelämän ohjaajana toimi DI Esa Yliherva Efora Oy:ltä.

Haluan kiittää Mattia opinnäytetyöni valvomisesta. Kiitän Esaa hyvästä ja mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta ja ohjauksesta. Kiitän myös koko telahuoltoryhmää ja telahiojia neuvoista.

Oulussa 21.3.2012.

Marko Juntunen

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Raahen tekniikan ja talouden kampus
Kone- ja tuotantotekniikka, Tuotanto- ja metallitekniikka

Tekijä: Juntunen Marko Kalevi

Opinnäytetyön nimi: 3D-kompensointihionnan vaikutus vastatelojen laatuun

Työn ohjaajat: Broström Matti, Yliherva Esa

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Kevät 2012

Sivumäärä: 48 + 10

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja selvittää 3D-kompensointihionnan vaikutus vastatelojen laatuun. Tämä opinnäytetyö on tehty Efora Oy:lle, joka vastaa StoraEnso Oyj:n paperitehtaiden kunnossapidosta Suomessa. Ongelmana on, että kunnossapidon suorittaman 3D-kompensointihionnan jälkeen osa vastateloista ei ole toiminut odotetusti tuotannossa. Työn tavoitteena oli selvittää, miksi 3D-kompensointihionta ei ole onnistunut osalle päällystyskoneen vastateloista.

Tässä opinnäytetyössä etsitään parannuskeinoja ja syitä tuotannossa esiintyville vastatelojen ongelmille. Nämä ns. ”huonoista vastateloista” johtuvat ongelmat ovat jo tiedossa. Tuotannon henkilöstön kertomusten mukaan päällystemäärän koneensuuntainen neliömassavaihtelu ei ole parantunut tietyillä vastateloilla korjaushionnan jälkeen. Aikaisempien tutkimusten mukaan vastatelojen dynaaminen geometria muuttuu, kun tela pyörii tuotantonopeutta. Efora Oy:llä on Waldrich Siegen telahiomakoneella Dynatest™ mittauslaitteisto, jolla mitataan ja analysoidaan vastatelojen dynaamisen geometrian käyttäytymistä tuotantonopeudessa. Mittauksen jälkeen käänteinen geometrinen korjauskäyrä syötetään telahiomakoneelle, jonka tietojen mukaan tela hiotaan vastaamaan tuotantonopeuden aiheuttamaa geometrista muutosta. Opinnäytetyössä tutkitaan myös olemassa olevien mittausten tuloksia vastatelojen staattisista ja dynaamisesta käyttäytymisestä. Opinnäytetyö koostuu kirjallisesta tutkimuksesta, vastatelojen mittauksista ja 3D-korjaushionnasta telahiomakoneella sekä mittausten ja näiden tulosten analysoinnista.

Työn aikana selvisi, että kaikki vastatelat eivät ole tasapainotusluokassa G1. Liian suuri epätasapaino aiheuttaa värinää ja dynaamista heittoa. Työn tuloksena selviää myös parannusehdotuksia vastateloille.

Asiasanat:

Vastatela, telahiomakone, paperikone, 3D-telahionta.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering

Author: Juntunen Marko Kalevi

Title of thesis: The effect of a 3D-compensation Grinding on Backing Rolls Quality

Supervisors: Broström Matti, Yliherva Esa

Term and year of completion: Spring 2012

Number of pages: 48 + 10

The aim of this Bachelor's thesis was to search and clarify the effect of a 3D-compensation grinding on backing rolls quality. This thesis was commissioned by Efora Ltd, which is responsible for the maintenance of StoraEnso Plc's factories in Finland. The problem is, that after maintenance has carried out a 3D-compensation grinding, some of the backing rolls have not worked as expected in the production. The aim of this work was to clarify why the 3D-compensation grinding has not been successful in some of the coating machine backing rolls.

This thesis tries to find out the cure and causes for the problems with production backing rolls. These problems have impact on many things and they are called "bad backing rolls". The production staff of the coating machine has reported that direction based weight variations have not improved some of the backing rolls after the compensation grinding. The previous researches show, that the backing rolls dynamic geometry changes when the roll is rotating in a production speed. Efora Ltd has a Waldrich Siegen roll grinding machine with Dynatest measuring equipment, which measures and analyzes backing rolls dynamic behavior in the production speed. After measurements the inverse geometric correction curve is fed to the grinding machine, according to the data of which the roll is ground to match geometric changes produced by the production speed. This thesis also examines the existing results of the measurements made for the backing rolls static and dynamic behavior. This thesis includes written examinations, backing rolls measurements and 3D-compensation grindings in the roll grinding machine and analyses of the measurements and their results.

During this work it was found out that all backing rolls are not in the balancing class G1. Too massive imbalance causes vibration and dynamic throws. This work also suggests improvements to backing rolls.

Keywords:

Backing roll, roll grinding machine, paper machine, 3D-roll grinding.

SISÄLLYS

SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
1.1 Työn taustaa	7
1.2 Yrityksen esittely	7
2 MÄÄRITELMÄ	9
3 PAPERIN PÄÄLLYSTYS	10
3.1 Paperinpäällystyskoneen toimintaperiaate	10
3.2 Paperinpäällystyskone PPK6 ja PPK7	10
3.3 OptiCoat Jet -päällystysaseman toimintaperiaate	11
3.4 Vastatela	12
3.5 Neliömassa	12
3.5 PPK6:n vastatelat	13
3.6 PPK7:n vastatelat	14
4 VASTATELAN STAATTISET JA DYNAAMISET OMINAISUUDET	16
4.1 Staattiset ja dynaamiset ominaisuudet	16
4.2 Vastatelojen geometria	16
4.2.1 Säteisheitto	17
4.2.2 Ympyrämäisyys	18
4.2.3 Halkaisijaerovirhe	18
4.2.4 Lieriömäisyys	19
4.3 Telojen ominaistajuus, värähtely ja kriittinen nopeus	19
4.4 Epätasapaino ja tasapainotus	22
4.5 Telavaipan valmistus ja seinämän paksuusvaihtelut	25
4.6 Telavaipan kuorimuodon muutos	28
4.7 Laakeroinnin pyörimistarkkuus	30
4.8 Muut tekijät	30
5 DYNAAMINEN MITTAUS JA 3D-KOMPENSOINTIHIONTA	32
5.1 Telahiomakoneet	33
5.1.1 Waldrich Siegen WS 3 CPT -telahiomakone	33
5.1.2 Rungon, johteiden, jäykkyyden ja suoruuden merkitys	34

5.1.3 Telahiomakoneen eri värähtelyt, perustus ja sijoitus	34
5.2 Telahiomakoneiden mittaus- ja ohjausjärjestelmien kehitys	35
5.2.1 Hiomakoneen johdevirheen kompensointi	35
5.2.2 Telojen pyörimisvirheen kompensointi staattisessa tilassa	35
5.2.3 Telojen optimointi prosessiolosuhteisiin	36
5.3 Dynatest™-mittalaite	36
5.3.1 Hybrid-menetelmä ja laser-nelipistemittalaite	37
5.3.2 Teladynamiikan mittaus	37
5.4 Vastatelan 3D-kompensointihionta	40
6 YHTEENVETO	44
LÄHDELUETTELO	46
LIITTEET	48

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Nykyään yksi paperikoneiden tuotannon tehokkuuden parannuskeinoista on tuotantonopeuden nosto. Kaikkia paperikoneen teloja ei ole suunniteltu kohonneisiin tuotantonopeuksiin. Tämä aiheuttaa ongelmia osalle paperikoneen teloista. Ongelmia ovat esimerkiksi telojen värähtelyt ja geometriset muodon muutokset tuotantonopeudessa. Myös päällystetyn paperin laatu vaihtelee, joka saattaa johtaa jopa tuotannon menetyksiin. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan 3D-kompensointihionnan vaikutuksia vastatelojen laatuun. 3D-kompensointihionnalla hiotaan telan ympyrämäisyys- ja halkaisijaeroprofiili vastaamaan tuotantonopeutta. Kunnossapidon ja tuotannon näkemykset vastatelojen 3D-kompensointihionnan laadusta vaihtelevat. Esimerkiksi kunnossapidon mukaan 3D-kompensointihionta on onnistunut ja telassa ei ole mitään geometrista vikaa. Tämä on aiheuttanut sen, että kyseinen tela ei ole toiminut odotetulla tavalla tuotannossa. Vastaavasti kunnossapidon mukaan huono tela geometrisesti on toiminut tuotannon mukaan hyvin.

Paperikoneissa kudoksia tai paperia kannattelevia pyöriä elimiä kutsutaan teloiksi. Poikkeuksen tästä nimityksestä muodostavat kuivatussylinterit. Teloja paperikoneissa voi olla jopa yli sata kappaletta. Telojen rakenteet määräytyvät niiden käyttötarkoituksen mukaan. Suuresta määrästä ja tiettyjen käyttötarkoituksesta johtuvien kalliiden rakenteiden takia telat muodostavat suurimman paperikoneen kustannuskokonaisuuden. Telojen osuus koko paperikoneen hinnasta on noin 60 prosenttia. (Niskanen, 1998, 2.)

1.2 Yrityksen esittely

Opinnäytetyö tehtiin Efora Oy:lle, joka on kunnossapito- ja engineering-palveluihin erikoistunut yritys. Yhtiön toiminta perustuu laajaan teollisuusprosessien tuntemukseen, asiakaslähtöisyyteen, laatu- ja kustannustietoiseen palveluun sekä pitkäaikaiseen kokemukseen teollisuuden investointi-projekteista. Efora on ABB:n ja StoraEnson yhteisyritys ja näin ollen ABB:n tytäryhtiö. ABB:n liiketoimintamalli perustuu ABB Full Service® -konseptiin. Yhtiö aloitti toimintansa 1.1.2009. StoraEnso omistaa yhtiöstä 51 prosenttia ja ABB 49 prosenttia. Toimipisteet sijaitsevat Heinolassa, Helsingissä, Imatralla, Kemissä, Oulussa, Uimaharjussa ja Varkaudessa. (Efora Oy 2012, haku-päivä 7.2.2012.)

Paperinvalmistus aloitettiin Oulussa vuonna 1991 ensimmäisen paperinvalmistuslinjan (PK6) ja arkittamon valmistumisen myötä. Nykyään Oulussa on toinenkin paperinvalmistuslinja (PK7), joka käynnistyi vuonna 1997. Tällä hetkellä vuosituotantokapasiteetti on vähän yli miljoona tonnia. Päämarkkina-alueet ovat Euroopassa, jonne suuntautuu noin kolme neljännestä kaikista toimituksista. Oulun tehtaan tuotteet on tarkoitettu korkealaatuisiin ja vaativiin painotöihin, kuten vuosikertomuksiin, esitteisiin ja muuhun markkinointimateriaaleihin sekä taide- ja kuvakirjoihin. StoraEnso Oyj:n omistaman tehtaan tuotemerkit ovat LumiArt ja LumiSilk. (StoraEnso Oyj 2012, hakupäivä 7.2.2012.)

2 MÄÄRITELMÄ

Opinnäytetyössäni tutkitaan paperin päällystyskoneen vastatelojen dynaamista käyttäytymistä tuotantonopeudessa. Vastatelojen dynaaminen geometria muuttuu, kun tela pyörii tuotantonopeutta. Efora Oy:lla on Waldrich Siegen telahiomakoneella Dynatest™-mittauslaitteisto, jolla mitataan ja analysoidaan telan dynaamisen geometrian käyttäytymistä tuotantonopeudessa. Mittauksen jälkeen käänteinen geometrinen korjauskäyrä syötetään telahiomakoneelle, jonka tietojen mukaan tela hiotaan vastaamaan tuotantonopeuden aiheuttamaa geometrista muutosta.

Ongelmana on, että kunnossapidon suorittaman 3D-kompensointihionnan jälkeen osa vastateloista ei ole toiminut odotetusti tuotannossa. Tuotannon henkilöstön kertomusten mukaan päällystemäärän koneensuuntainen neliömassavaihtelu ei ole parantunut tietyillä vastateloilla korjaushionnan jälkeen. Päällystemäärän neliömassavaihtelu vaikuttaa paperin profiiliin, päällystyskoneen ajettavuuteen ja on yksi paperin laatukriteereistä.

Opinnäytetyössäni tullaan pohtimaan ja etsimään mahdollisia parannuskeinoja tuotannon mukaan ns. ”huonoille vastateloille”, jotka ovat jo tiedossa.

3 PAPERIN PÄÄLLYSTYS

Paperin päällystämällä tarkoitetaan niiden pinnoittamista erilaisilla aineilla. Päällyste levitetään yleensä vesiseoksena paperin pintaan, minkä jälkeen sen sisältämä ylimääräinen vesi haihdutetaan erilaisilla päällysteen kuivatukseen tarkoitetuilla laitteilla. Erikoispapereita voidaan päällystää liuotinpohjaisilla pastoilla. Päällystyksessä on yleensä tarkoitus täyttää paperin pinnan epätasaisuudet yhdellä tai useammalla päällystyskerroksella. Päällystys vaikuttaa ensisijaisesti paperin painettavuusominaisuuksiin ja ulkonäköön. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, 184.)

3.1 Paperinpäällystyskoneen toimintaperiaate

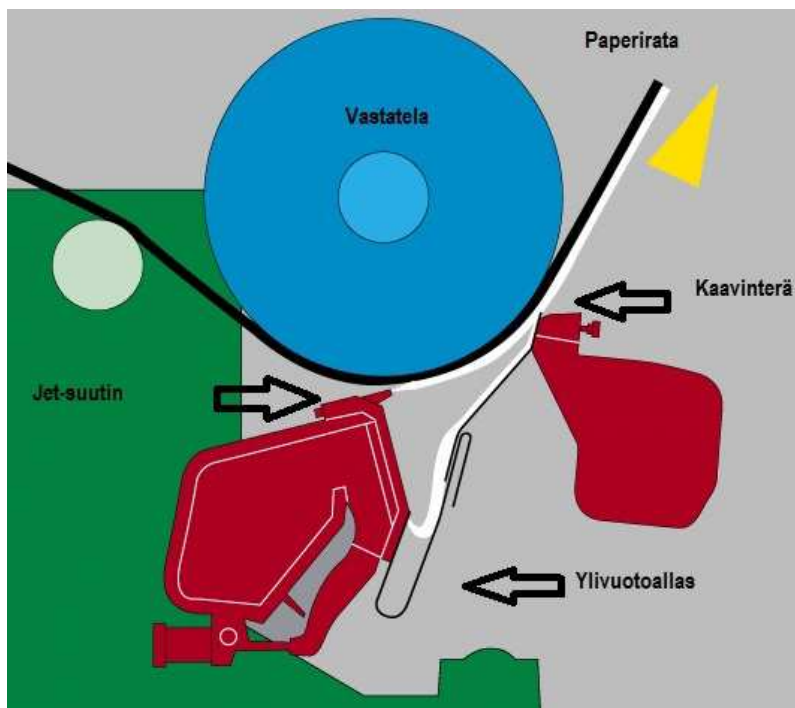
Varsinainen paperinpäällystyskone alkaa konerullan aukirullaimella. Aukirullaimen jälkeen tulevat paperiradan levitys- ja kireydenmittaustelat. Kireydenmittaustelalta paperirata johdetaan paperinjohtoteloilla kellarin kautta ensimmäiselle päällystysasemalle. Ennen ensimmäistä päällystysasemaa on mittauslaitteisto. Mittauslaitteistolla seurataan lähinnä paperin kosteus- ja paksuusprofiilia sekä neliöpaino- ja kosteustasoa. Mittauslaitteiston jälkeen paperi tulee edellä mainitulle ensimmäiselle päällystysasemalle. Aluksi levitystelalla levitetään paperi poikittaissuunnassa tasaiseksi, jolloin erilaiset reunavaikkeudet vähenevät päällystysajan aikana. Päällysteen applikoinnin ja kaavinnan jälkeen yläpuolen päällystekerros kuivataan heti ensimmäisen aseman jälkeen olevilla infrakuivaimilla, leijukuivaimilla ja sylinteriryhmällä. Ensimmäisen aseman jälkeen mittauslaitteistolla seurataan päällystemäärää ja profiilia. Toisella asemalla päällystetään paperin alapuoli, samalla tavalla kuin ensimmäisellä asemalla. Tämän jälkeen päällystetään paperin yläpuoli toiseen kertaan kolmannella asemalla samalla periaatteella. Viimeisenä päällystetään paperin alapuoli toiseen kertaan neljännellä asemalla. Lopuksi kuivatuksen jälkeen paperi rullataan kiinnirullaimella konerullaraudalle. (Valmet, 1997, 2–5.)

3.2 Paperinpäällystyskone PPK6 ja PPK7

Oulun paperinpäällystyskone PPK6 on Valmetin vuonna 1991 valmistama. Tuotantonopeus päällystyskoneella on 1170 m/min tai 1400 m/min riippuen ajettavasta paperin laadusta. Telojen kehänopeus on siis 70 km/h tai 84 km/h, mikä aiheuttaa korkeita laatu- ja tarkkuusvaatimuksia vastatelojen dynaamiselle geometrialle. PPK7 on myös Valmetin valmistama ja käynnistyi vuonna 1997. Tuotantonopeus PPK7:lla on 1800 m/min.

3.3 OptiCoat Jet -päälystysaseman toimintaperiaate

OptiCoat Jet on päälystysasema, joka päälystää paperin yhdeltä puolelta kerrallaan. Päälystys perustuu kuvassa 1 näkyvään jet- eli suutinapplikointiin, jossa pasta johdetaan radan pinnalle kapean suutinraon kautta. Päälystyspasta syötetään pastan konekierrosta pumppujen ja pastaletkujen avulla jet-palkin takapinnassa olevan jakotukin päähän. Ennen jet-asemaa konekierrossa on ilmanpoistin, jossa pastan sisältämä vapaa ilma poistetaan. Applikoitu päälystyspastamäärä jää kokonaisuudessaan päälystettävän radan pinnalle ja kulkeutuu radan mukana kaavinterälle. Kaavinterällä ylimääräinen päälystyspasta kaavitaan pois. Samalla päälystemäärä säädetään halutun suuruiseksi sekä kone- että poikkisuunnassa. (Metso, 2001, 1.)



KUVA 1. Opticoat Jetin toimintaperiaate (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, 194.)

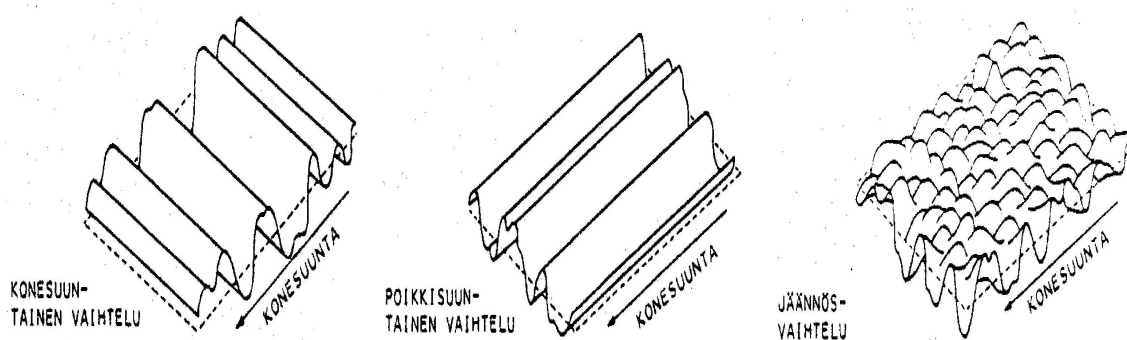
Päälystemäärää säädetään muuttamalla kaavinterän voimatasapainoa, jolloin kaavinterän kohdistama voima vastatelan tukemaa paperirataa vasten muuttuu ja päälystemäärä saadaan halutuksi. Tyypillisesti teräpäälystyksessä kaavinterän voimatasapainoa muutetaan joko kuormittamalla kaavinterää tai säätämällä terän ja paperiradan välistä kulmaa. (Pullinen, Juhanko, Kuosmanen, 1997, 9–10.)

3.4 Vastatela

Vastatelan tehtävänä on ohjata paperirata kulkemaan päällystysaseman läpi sekä tukea paperirataa päällystystapahtumassa. Teräpäällystyksessä syntyvän päällystemäärävaihtelun on todettu olevan yhteydessä päällysteaseman vastatelan pyörimisnopeuteen, joten vastatelan dynaamisella käyttäytymisellä näyttäisi siten olevan huomattavaa vaikutusta päällystemäärävaihteluun. (Pulinen ym. 1997, 8–9.)

3.5 Neliömassa

Paperin neliömassalla tarkoitetaan paperin massaa grammoina laskettuna neliometriä kohti (g/m^2). Se mitataan paperikoneella β -säteilyn absorptioon perustuvalla on-line-mittauksella. Neliömassan, joka vaikuttaa useimpiin muihin ominaisuuksiin, pitää olla tasainen kaikkiin suuntiin. Vaihtelut voidaan jakaa kuvan 2 mukaisesti konesuuntaisiin, poikkisuuntaisiin ja jäännösvaihteluun. Jäännösvaihteluksi sanotaan sitä vaihtelua, joka jää jäljelle, kun neliömassan vaihtelusta eliminoidaan laskennallisesti edellä mainitut systemaattiset kone- ja poikkisuuntaiset vaihtelut. Jäännösvaihtelu on epäsystemaattista, satunnaista vaihtelua. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, 78–79.)



KUVA 2. Neliömassavaihtelun osatekijät. (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 2003, 79.)

Paperitehtaissa on havaittu ratanopeuksien kasvaessa yhä suurempaa koneensuuntaista neliömassavaihtelua pigmenttipäällystetyillä paperilaaduilla. Tämän neliömassavaihtelun yhtenä merkittävänä syynä pidetään teräpäällystyksessä syntyvää päällystemäärävaihtelua. Eräällä päällystyskoneella tyypillinen päällystemäärän vaihtelu on ollut paperilaadusta riippuen $1 - 4 \text{ g/m}^2$, kun hyvä arvo olisi alle $0,5 \text{ g/m}^2$. Päällystemäärävaihtelu heikentää päällystetyn paperin profiilia ja tasalaatuisuutta, jotka ovat painatuksen kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia. Laatuvihtelusta

johtuen paperin myyntihinta voi laskea tasalaatuisempaan paperiin nähden. (Pullinen ym. 1997, 7–8.)

3.5 PPK6:n vastatelat

Tuotanto on arvostellut PPK6:n vastatelat paremmuusjärjestykseen, niin sanottuihin hyviin ja huonoihin teloihin, niiden koneensuuntaisen neliömassavaihtelun perusteella. Taulukosta 1 on nähtävissä telojen paremmuusjärjestys ja telatunnukset. Dynaaminen mittaus ja 3D-kompensointihionta ovat vaikuttaneet koneensuuntaisen neliömassavaihtelun pienenemiseen suurimmalle osalle vastateloista. (Lielähti 7.11.2011, keskustelu.)

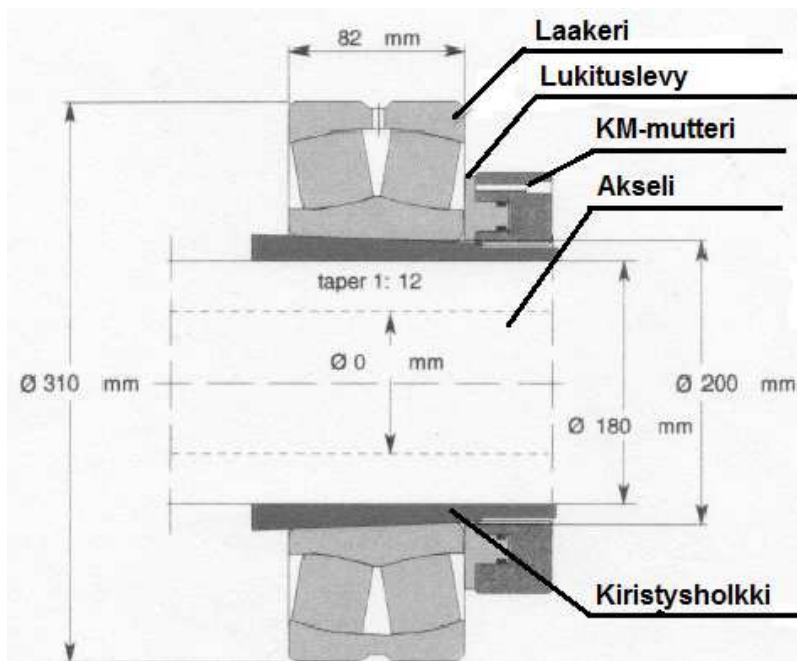
TAULUKKO 1. PPK6: vastatelojen paremmuusjärjestys.

PPK6	Telatunnus	
1.	1746	Erinomainen tela
2.	1742	Erinomainen tela
3.	1740	Hyvä tela
4.	1744	Hyvä tela
5.	1743	Hyvä tela
6.	1741	Huono tela
7.	1745	Huono tela

PPK6:n vastatelat ovat putkirunkoisia teloja, jotka ovat valmistettu useammasta teräslevystä taittamalla, hitsaamalla ja sorvaamalla ulkokuori. Vastatelassa on päätylaipat ja akselitapit molemmissa päissä ja ne on kiinnitetty putkirunkoon ahdistus- ja hitsausliitoksien avulla. Putkirungon päällä on kumipinnoite, joka on vahvuudeltaan noin 25 millimetriä. Vastatelat vaihdetaan tiettyin väliajoin, yleensä niiden kumipinnoitteen muotoprofiilin kulumisen vuoksi. Kulunut vastatela hiotaan telahiomakoneella vastaamaan sille asetettuja toleransseja. Myös pinnankarheudelle on asetettu vaatimuksia. Tietty pinnankarheus saavutetaan telahiomakoneessa olevalla Superfinish-laitteella. Superfinish-hionta suoritetaan yleensä 3D-telaihionnan jälkeen.

PPK6:lla vastateloja on yhteensä seitsemän kappaletta, joista kolme on varatelana. Vastatelan laakerointi on kuvassa 3. Laakerointi on pallomainen rullalaakeri, joka toteutettu suoralle akselille

kiristysholkilla. Telan käyttöpää on kiinteä ja hoitopää vapaasti liikkuva, joka sallii lämpötilan aiheuttamat pituuden muutokset. Laakereiden voiteluna on kiertorasvoitelu.



KUVA 3. PPK6:n vastatelan laakerointi. (SKF 2001.)

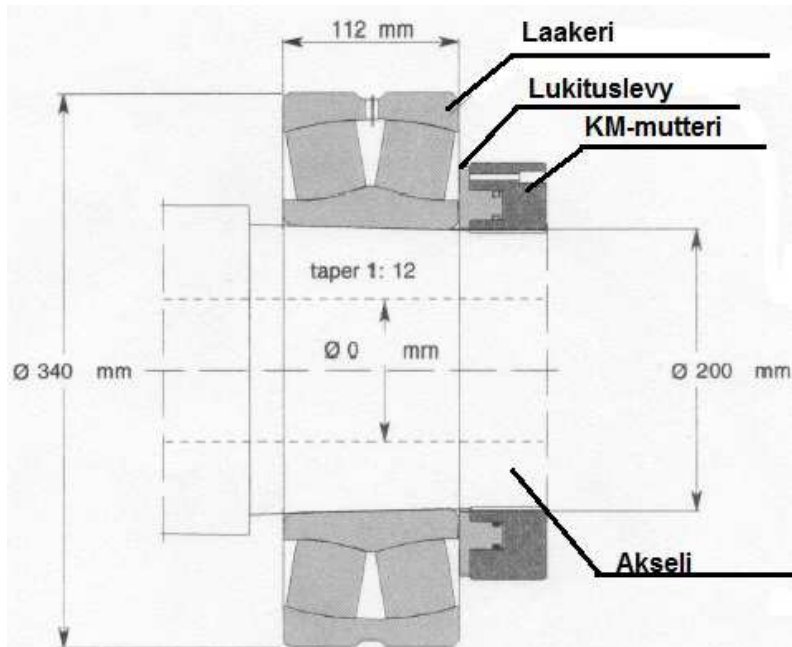
PPK6:n vastatelojen päämitat:

- kokonaismassa laakeroituna 14450 kg
- laakerointiväli 9650 mm
- vaipan pituus 8650 mm
- nimellishalkaisija 1250 mm
- minimi halkaisija 1225 mm

3.6 PPK7:n vastatelat

PPK7:n vastatelat ovat tarkkuusvastateloja. Niitä on myös yhteensä seitsemän kappaletta, joista neljä on tuotannossa ja kolme toimii varatelana. Tarkkuusvastatela on valmistettu tiukemmillä valmistustoleransseilla kuin tavallinen vastatela. Muun muassa telan vaippa-aihon sisäputki on koneistettu. Koneistuksella pyritään vähentämään vaipan seinämän paksuusvaihtelua. Telan laakerointi myös poikkeaa PPK6:n vastateloista. Laakerointi on toteutettu kartiolle akselille, joka

on parempi laakerin kiinnitystapa kuin kiristysholkkikiinnitys. Laakereiden voiteluna on kiertoöljyvoitelu. Kuvassa 4 on PPK7:n vastatelan pallomaisen rullalaakerin asennustapa.



KUVA 4. PPK7:n vastatelan laakerointi. (SKF 2001.)

PPK7:n vastatelojen päämitat:

- kokonaismassa laakeroituna 14800 kg
- laakerointiväli 9700 mm
- vaipan pituus 8700 mm
- nimellis halkaisija 1250 mm
- minimi halkaisija 1222 mm

4 VASTATELAN STAATTISET JA DYNAAMISET OMINAISUUDET

Tässä kappaleessa perehdytään vastatelan geometriaan, staattisiin ja dynaamisiin ominaisuuksiin ja niihin liittyviin termeihin ja käsitteisiin. Nopeuksien noustessa telojen rakenteellisista virheistä johtuvat dynaamiset ongelmat korostuvat. Telan dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat telan rakenne, jäykkyys ja massan jakautuminen telan vaipassa. Teloja ajettaessa suurilla nopeuksilla, jo pienikin massan epätasainen jakautuminen vaikuttaa dynaamiseen käyttäytymiseen. Telan pyörimiskeskion suhteen epäkeskeinen massan jakautuminen telan poikkileikkauksessa aiheuttaa muun muassa epätasapainoa ja kuorimuodonmuutoksia. Massan jakautuminen riippuu tasapainotusmassoista, laakeri-laakerilinjan poikkeamisesta painopisteakselilta, epäjatkuuskohtista, kuten hitsisaumoista ja telavaipan seinämäpaksuusvaihtelusta. (Forsberg, 2006, 9–10.)

4.1 Staattiset ja dynaamiset ominaisuudet

Merkittävä osa telojen mittauksista edellyttää telojen pyörimistä. Staattisella pyörimisellä tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä ilmiötä, jotka esiintyvät telojen pienillä pyörimisnopeuksilla, esimerkiksi paperikoneen ryömintänopeudella 50 m/min tai telojen hiontanopeudella. Pienillä nopeuksilla telan käyttäytyminen ei vielä muutu nopeuden funktiona. Dynaamisella pyörimisellä tarkoitetaan puolestaan ilmiötä, joka esiintyy vasta suuremmilla telan pyörimisnopeuksilla. (Pokela, 2006, 18). Telojen dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttavat useat eri tekijät, kuten tuenta, ympäristöolosuhteet ja telavirheet. Telavirheet syntyvät useimmiten telan valmistusvaiheessa. Telavirheiden aiheuttamat dynaamiset ja staattiset ominaisuudet ovat usein ongelmallisia telan dynaamisen tasapainon ja kuorimuodonmuutosten suhteen. (Forsberg, 2006, 18–19.)

4.2 Vastatelojen geometria

Telasta mitattavia suureita tarvitaan telan geometrian tutkimisessa ja näitä ovat:

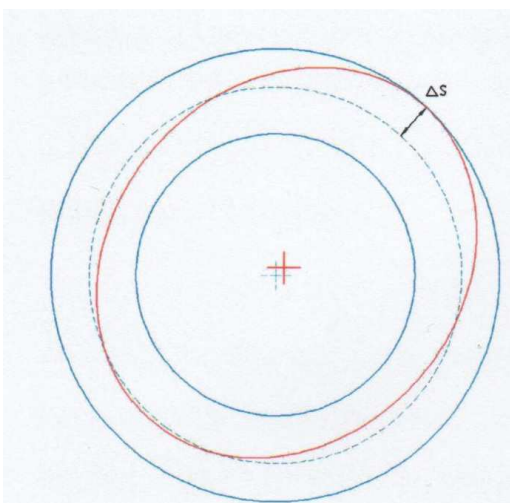
- staattinen ja dynaaminen säteisheitto,
- telavaipan ja akseleiden staattinen ja dynaaminen ympyrämäisyys,
- staattinen ja dynaaminen halkaisijaprofiili,
- telavaipan staattinen ja dynaaminen lieriömäisyys,
- vaipan ja akseleiden kartiokkuus,
- telan alkukäyryys ja luonnollinen taipuma,

- pyörimiskeskiviivan liikerata eli kieppuminen,
- telavaipan seinämänpaksuus,
- epätasapaino ja pinnankarheus. (Juhanko, 2011, 48.)

Edellä mainituista suureista telavaipan seinämänpaksuus ja epätasapaino eivät ole staattisesti geometrisia suureita, mutta ne aiheuttavat telaan dynaamisia geometriavirheitä. Pinnankarheus ei varsinaisesti ole geometrinen ominaisuus, mutta jotkut värähtelytyypit saattavat aiheuttaa esimerkiksi kalanterin telan raipottumisen, joka voidaan lukea säännölliseksi pinnankarheuden vaihteluksi. Tämä aiheuttaa paperissa kiiltovaihteluita. (Juhanko, 2011, 48.)

4.2.1 Säteisheitto

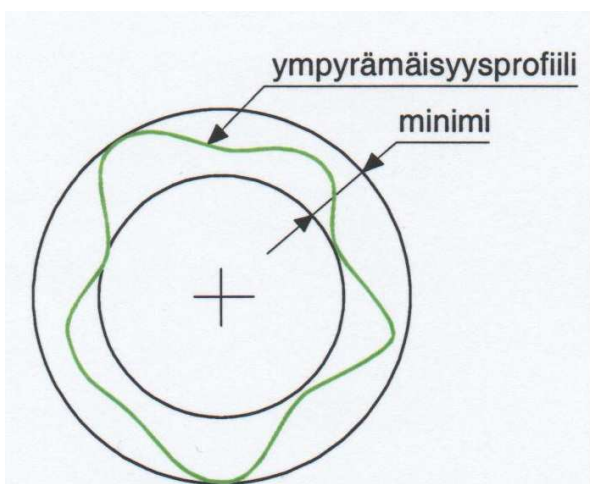
Kuvassa 5 telan pinnan säteensuuntaista liikettä kutsutaan telan heitoksi. Heittoa aiheuttavat laakeroinnin pyörimisvirheet sekä telan geometriavirheet ja värähtelyt. Telan heitto vaikuttaa kaavinterän voimatasapainoon ja siten myös päällystyksessä syntyvään päällystemäärävaihteluun. Merkittävimmät heiton staattisiin komponentteihin vaikuttavat asiat ovat akseleiden laakerointi ja telan hionta. Telan pintaan voi syntyä hionnan aikana staattisia geometriavirheitä, joita aiheuttavat telan oman laakeroinnin pyörimisvirheet. Heiton dynaamisiin komponentteihin vaikuttavat erityisesti telan rakenne ja tasapainotus. Ratanopeuksien kasvaessa heiton dynaamiset komponentit lisäävät telan heittoa, ellei telan rakennetta ja tasapainotusmenetelmiä kehitetä. (Pullinen ym. 1997, 11–12.)



KUVA 5. Säteisheitto. (Kojonen 2003, 32.)

4.2.2 Ympyrämäisyys

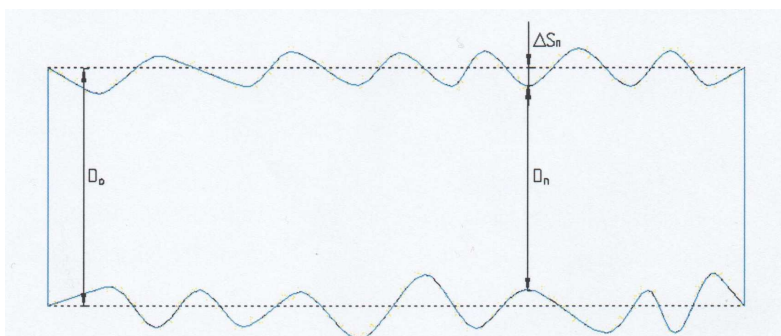
Kuvassa 6 ympyrämäisyydellä tarkoitetaan aluetta, jota rajoittaa kaksi samankeskistä ympyrää profiilin sisä- ja ulkopuolelle siten, että ympyröiden säteiden erotus on minimi ja ympyröiden keskipisteet yhtyvät poikkileikkaus-profiilin keskipisteeseen. Säteiserot keskipisteestä esittävät ympyrämäisyysprofiilia. Ympyrämäisyys on näiden säteiserojen maksimin ja minimin erotus. (Kojonen, 2003, 31.)



KUVA 6. Ympyrämäisyys. (Kojonen 2003, 31.)

4.2.3 Halkaisijaerovirhe

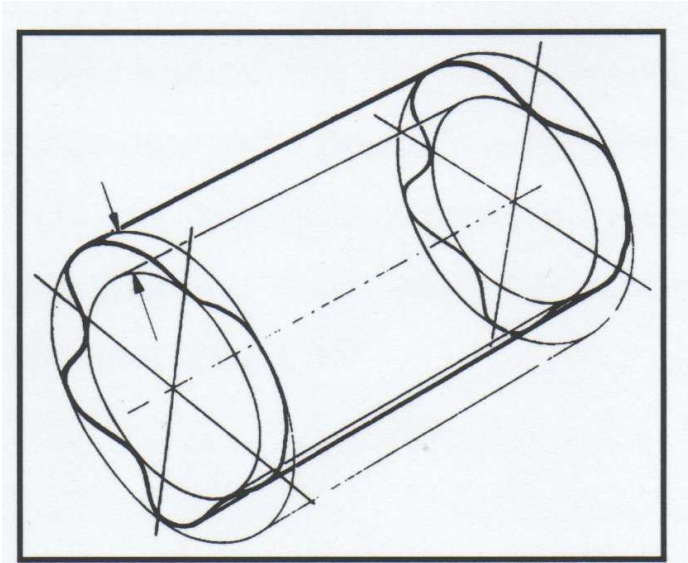
Kuvassa 7 halkaisijaerovirhe saadaan mittaamalla telan halkaisija useasta kohtaa telan pituus-suunnassa. Mitatun telan pinnan profiili saadaan jakamalla mitatut arvot kahdella. Mittapoikkeama ΔS_n saadaan vähentämällä referenssiahkaisijasta D_0 mittauspisteen halkaisija D_n ja jakamalla tulos kahdella. Peräkkäiset mittapisteet muodostavat halkaisijaeroprofiilin. (Kojonen, 2003, 30.)



KUVA 7. Halkaisijaeroprofiili. (Kojonen 2003, 30.)

4.2.4 Lieriömäisyys

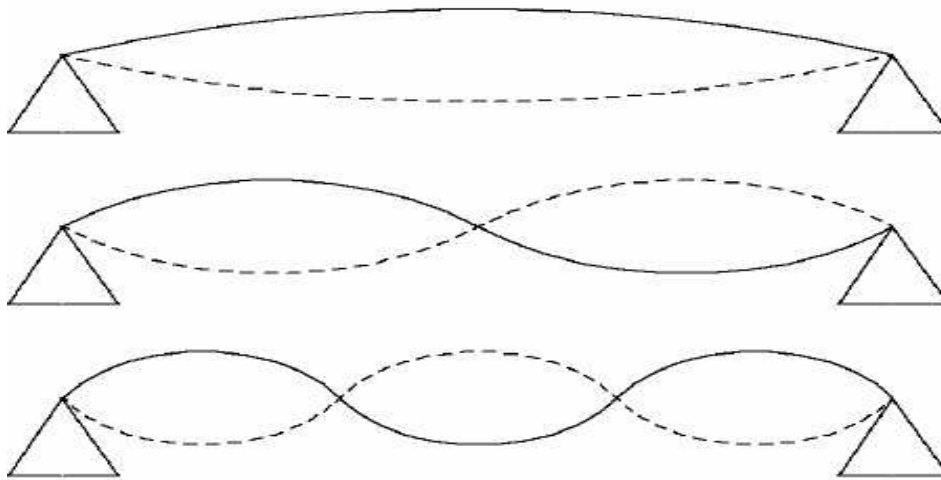
Lieriömäisyys tarkoittaa kahden saman akselin lieriöpinnan rajoittamaa aluetta, jotka on valittu siten, että niiden etäisyys toisistaan on minimi kuvan 8 mukaisesti. Lieriömäisyys voidaan muodostaa yhdistämällä kaksi tai useampia ympyräjäykkämittauksia ja halkaisijaeromittauksia. (Kojonen, 2003, 31.)



KUVA 8. Lieriömäisyys. (Kojonen, 2003, 31.)

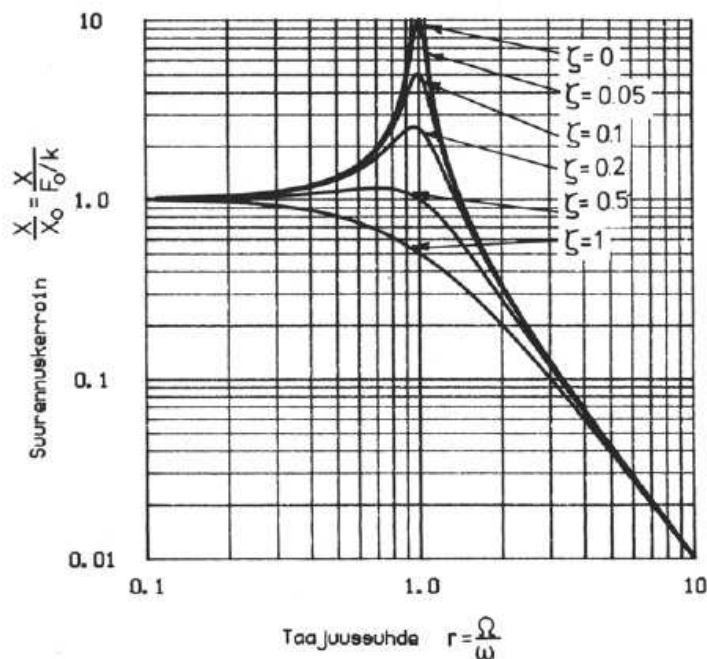
4.3 Telojen ominaistajuus, värähtely ja kriittinen nopeus

Telan ominaistajuuksia voidaan tarkastella vapaasti tuetun homogeenisen palkin ominaistajuuksien avulla. Homogeeninen palkki on jakautuneista suureista muodostunut jatkuvan aineen värähtelyjärjestelmä, jolla on ääretön määrä ominaistajuuksia. Jokaisella ominaistajuudella on oma ominaismuotonsa, joka muodostuu värähtelymaksimeista ja värähtelyminimeistä. Telan ominaistajuudella tarkoitetaan yleensä poikittaisvärähtelyn ensimmäisen ominaismuodon ominaistajuutta, joka on kuvassa 9 ylimpänä. Ominaisajuus riippuu telan rakenteesta ja käytetyistä materiaaleista. (Pullinen ym. 1997, 12.)



KUVA 9. Vapaasti tuetun palkin kolme ensimmäistä ominaismuotoa. (Pullinen ym. 1997, 12.)

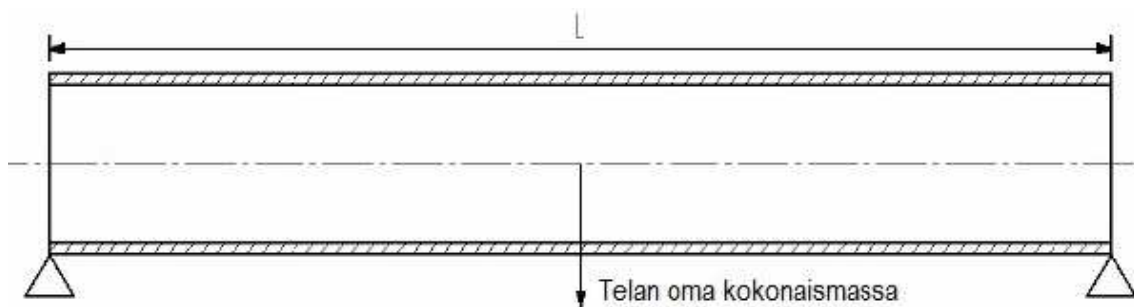
Kriittisellä nopeudella tarkoitetaan telan pyörimisnopeutta, jonka taajuus on sama kuin telan ominaistajuus ω . Kriittisessä nopeudessa kerran kierroksella esiintyvä heräte aiheuttaa voimakaimmin telaan ominaistajuista värähtelyä, koska silloin herätteen taajuuden Ω ja telan ominaistajuuden ω taajuussuhde on yksi ja herätteen suurennuskerroin saavuttaa suurimman arvonsa. Herätteen aiheuttaman telan ominaistajuisen värähtelyn suuruus riippuu herätteen voimakkuudesta ja telan rakenteen vaimennuskyvystä ζ . Kuvassa 10 on esitetty herätteen suurennuskerroin taajuussuhteen Ω/ω funktiona eri vaimennuksien ζ arvoilla. (Pullinen ym. 1997,12.)



KUVA 10. Herätteen suurennuskerroin taajuussuhteen funktiona. (Pullinen ym. 1997, 13.)

Telan värähtelyn saa aikaan telaan kohdistuva jaksollinen heräte. Herätteen taajuuden lähestyessä ominaistajuutta kasvaa värähtelyn amplitudi voimakkaasti. Tavallisin heräte on epätasapaino. Epätasapainosta johtuvan värähtelyn amplitudiin ei vaikuta telan sisäinen vaimennus, koska tällöin telan mukana pyörivässä koordinaatistossa telan taipuma on aina samansuuntainen epätasapainon kanssa eikä näin tapahdu vaipan jaksottaisia muodonmuutoksia. Matalaan värähtelytasoon päästään mahdollisimman pienellä epätasapainolla ja toimimalla riittävän kaukana kriittisestä pyörimisnopeudesta. Teloilla on havaittavissa myös alikriittisiä pyörimisnopeuksia. Esimerkiksi $1/3$ -kriittinen, $1/4$ -kriittinen ja puolikriittinen ajonopeus. (Niskanen, 1998, 5–6.)

Telan ominaistajuus voidaan laskea kuvassa 11 esitetyn hyvin yksinkertaisen telan kuormitus- ja taivutusmallin avulla. Yksinkertaistetussa kuormitus- ja taivutusmallissa tela otaksutaan suoraksi ilman päätyjä ja akselitappeja olevaksi telavaipaksi, joka on päistään vapaasti tuettu ja jonka massa- ja jäykkyysjakauma on koko tukivälillä vakio. (Pullinen ym. 1997, 14.)



KUVA 11. Yksinkertaistettu telavaipan kuormitus- ja taivutusmalli. (Pullinen ym. 1997, 14.)

Sovelletaan tähän yksinkertaistettuun telamalliin Bernoullin-Eulerin värähtely-yhtälöä ottamatta huomioon laakerijoustoa, epäkeskisyyksiä, esikäyristystä, massajakaumaa ja jäykkyyseroa. Tällöin saadaan laskettua ainoa käytännössä tarvittava ominaistajuus eli telan ensimmäisen ominaismuodon ominaistajuus ω_1 kaavasta (1)

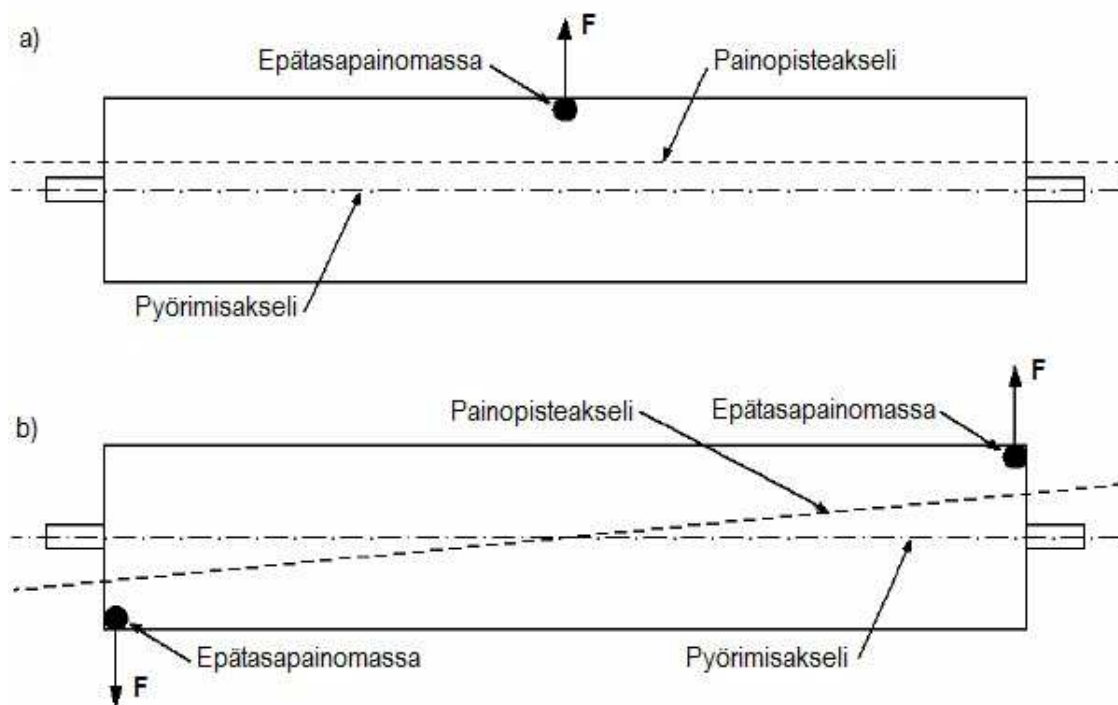
$$\omega_1 = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (1),$$

missä E = vaipan kimmomoduuli,
 I = vaipan poikkileikkauksen jäyhyysmomentti,
 m = vaipan massa pituusyksikköä kohti ja

L = vaipan tukipisteiden välimatka. (Pullinen ym. 1997, 14.)

4.4 Epätasapaino ja tasapainotus

Telan epätasapaino johtuu telavaipan epäkeskeisestä massajakaumasta ja voidaan jakaa staattiseksi ja dynaamiseksi epätasapainoksi. Staattinen epätasapaino tarkoittaa tilannetta, jossa telan painopiste akseli eroaa pyörimisakselista yhdensuuntaisesti. Dynaaminen epätasapaino puolestaan tarkoittaa tilannetta, jossa nämä akselit ovat erisuuntaisia. Dynaamisen epätasapainon voidaan ajatella aiheutuvan kahdesta telan vastakkaisilla puolilla, eri päissä telaa, olevasta keskenään yhtä suuresta epätasapainomassasta, jotka telan pyöriessä saavat aikaan voimaparin. Kuvassa 12 on esitetty näiden epätasapainolajien periaatteet. Käytännössä kyseessä on aina staattisen ja dynaamisen epätasapainon yhteisvaikutus. Epätasapainon seurauksia ovat muun muassa telan värinä ja laakerikuormituksen kasvaminen sekä dynaaminen taipuma, joka aiheuttaa telan heittoa. Näitä haitallisia ilmiöitä pyritään minimoimaan telan tasapainotuksella, jossa on kyse telavaipan massajakauman korjauksesta siten, että jäännösepätasapaino ja taipuma saadaan sallittujen rajojen sisälle. (Pokela, 2006, 23.)



KUVA 12. Staattisen a) ja dynaamisen b) epätasapainon periaatekuvat (Pokela, 2006, 23.)

Tasapainotus on menetelmä, jolla pyritään parantamaan pyörivän massan tasapainoa niin, että se pyörisi laakeroinneillaan ilman epätasapainon aiheuttamia keskeisvoimia. Tämä on kuitenkin mahdollista vain tiettyyn rajaan saakka. Tasapainotuksen jälkeenkin on pyörivässä kappaleessa jäljellä epätasapainoa. Nykyisten mittausvälineitten avulla voidaan päästä melko pieniin epätasapainon määriin. (SFS ry 2012, hakupäivä 20.2.2012.)

Paperikoneiden telat tasapainotetaan yleensä kahdessa tasossa, poikkeuksellisesti jopa kolmessa tasossa. Paperikoneen telat sijoittuvat tavallisesti SFS-standardin 4968 tasapainotustarkkuusluokkien G1 ja G2,5 väliin. Tasapainotustarkkuusluokka G2,5 tarkoittaa sitä, että painopisteen nopeus v ei saa ylittää arvoa 2,5 mm/s. Tätä ei pidä kuitenkaan sekoittaa värähtelynopeuden arvoon, joka myös ilmaistaan yksikössä mm/s. (Lahdelma 2003, 69.)

Seuraavassa esimerkissä on laskettu sallittu jäännösepatasapaino PPK6:n vastatelalle, jonka halkaisija on 1250 mm ja ratanopeus 1400 m/min. Ensimmäiseksi lasketaan telan kierrostaajuus kaavasta 2

$$n = \frac{v}{2 * \pi * r} \quad (2),$$

missä n = telan pyörimisnopeus,
 v = telan ratanopeus ja
 r = telan säde. (Tekniikan kaavasto 2002, 92.)

$$n = \frac{23,33 \text{ m/s}}{2 * \pi * 0,625 \text{ m}} = 5,94 \text{ r/s}$$

Kaava 3 antaa sallitun jäännösepatasapainon m_{sall} grammoina tasapainotustasoa kohti, kun vastatelan massa ilmoitetaan kilogrammoina ja tasapainotussäde metreinä. (SKF 2002, 9.)

$$m_{\text{sall}} = \frac{\text{luokka} * \text{massa} * 0,16}{\text{r/s} * \text{tasot} * r} \quad (3),$$

$$m_{\text{sall.}} = \frac{1 * 14450 \text{ kg} * 0,16}{5,94 \text{ r/s} * 2 * 0,625 \text{ m}} = 311 \text{ g}$$

Yllä olevien kaavojen avulla lasketut sallitut jäännösepätasapainot kaikille vastateloille, jotka ovat taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Tasapainotusluokat ja sallitut jäännösepätasapainot ja PPK6:n ja PPK7:n vastateloille.

Telatunnus PPK6	Tasapainotusluokka Nopeus 1400 m/min	Sallittu jäännösepätasapaino g
1740	G1,0	311 g
1741	G2,5	778 g
1742	G1,0	311 g
1743	G1,0	311 g
1744	G1,0	311 g
1745	G2,5	778 g
1746	G1,0	311 g
Telatunnus PPK7	Tasapainotusluokka Nopeus 1800 m/min	Sallittu jäännösepätasapaino g
2760602	G1,0	249 g
2760604	G1,0	249 g
2760606	G1,6	399 g
2760608	G1,6	399 g
2760609	G1,6	399 g
2760610	G1,6	399 g
2760611	G1,0	249 g

Yllä olevasta taulukosta käy ilmi, että PPK6:n vastateloissa 1741 ja 1745 tasapainotusluokka on G2,5. Tämä tarkoittaa myös suurempaa sallittua jäännösepätasapainoa telan molempiin päihin. Tuotannon mukaan vastatelat 1741 ja 1745 ovat myös huonoimmat.

Ei ole kovinkaan yksinkertaista tehdä päätelmiä sallitusta jäännösepätasapainosta minkään voimassa olevan suosituksen perusteella, koska ei voida helposti tunnistaa pyörivän telan epätasa-

painon ja värähtelyn välistä suhdetta toimintaolosuhteissa. Värähtelyn amplitudiin vaikuttavat monet tekijät kuten värähtelevä massa ja sen kiinnitys, laakeroinnit ja alustan jäykkyys tai miten lähellä toimintanopeus on erilaisia resonanssitaajuuksia. (SFS ry 2012, hakupäivä 20.2.2012.)

Telan pyöriessä epäkeskeinen massa synnyttää telaan vaikuttavan keskipakovoiman, joka aiheuttaa päistään tuetun joustavan telan dynaamisen taipuman. Epäkeskeisen massan synnyttämä keskipakovoima F voidaan laskea kaavasta (4)

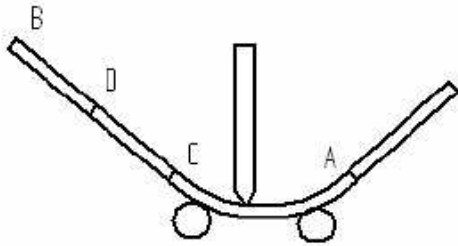
$$F = M \frac{e\omega^2}{1 - \left[\frac{\omega}{\omega_{kr}} \right]^2} \quad (4),$$

missä F = poikkileikkauksessa vaikuttava keskipakovoima,
 M = epäkeskeinen massa,
 ω = telan pyörimiskulmanopeus,
 ω_{kr} = telan kriittinen pyörimiskulmanopeus ja
 e = massan epäkeskeisyys telan pyörimisakseliin nähden. (Pullinen ym. 1997, 15.)

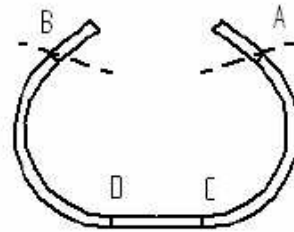
4.5 Telavaipan valmistus ja seinämän paksuusvaihtelut

Vastatelan vaippa-aiho valmistetaan yleisimmin joko hitsattuna levyrakenteena tai valamalla. Vaippa-aihion valmistusmenetelmänä käytetään tavallisesti joko rullamuovausta tai taivuttamista. Telavaipan putkiaihion valmistuksen vaiheet näkyvät kuvassa 13. Ensimmäisessä vaiheessa levy taivutetaan kohdasta A kohtaan C ja kohdasta B kohtaan D. Vaiheessa 2 aihion päistä leikataan työvarat pois ja samalla tehdään hitsausviisteet. Vaiheissa 3 ja 4 aihion pohjan suora osa taivutetaan ja hitsataan juuripalkko. Vaiheessa 5 tehdään ensin putkiaihion hitsaussauman vastapuolelle hitsin mittainen vastakuumennus, jonka tarkoituksena on kompensoida hitsauksen aiheuttama käyristyminen. Vaiheessa 6 tela kalibroidaan. Tämän tarkoituksena on tasoittaa hitsauksesta aiheutuvia jäännösjännityksiä ja korjata muotovirheitä. (Forsberg, 2006, 13.)

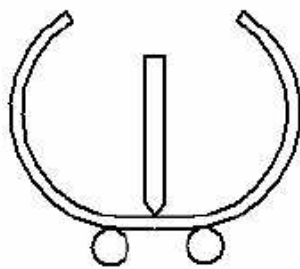
1. Alkutaivutus



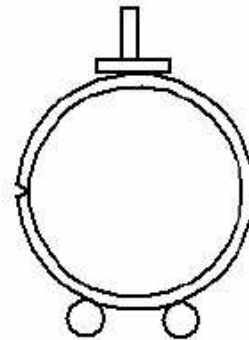
2. Työvarojen poisto



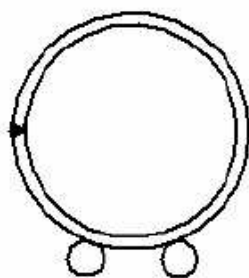
3. Pohjan taivutus



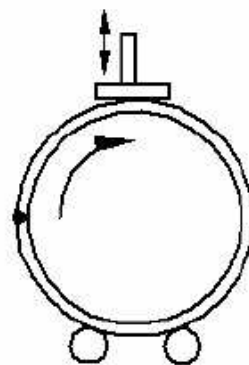
4. Juuren hitsaus



5. Vastakuumennus ja hitsaus

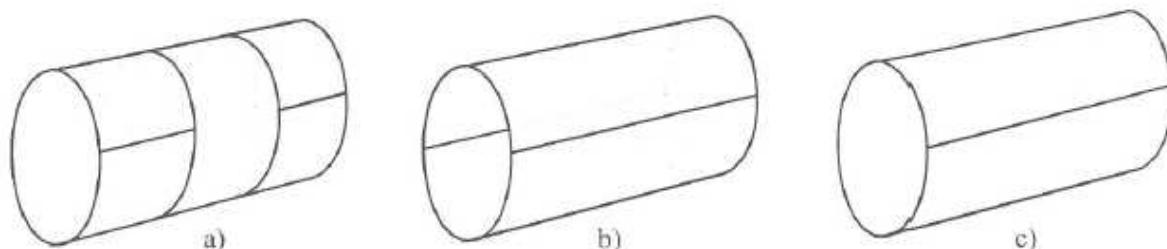


6. Kalibrointi



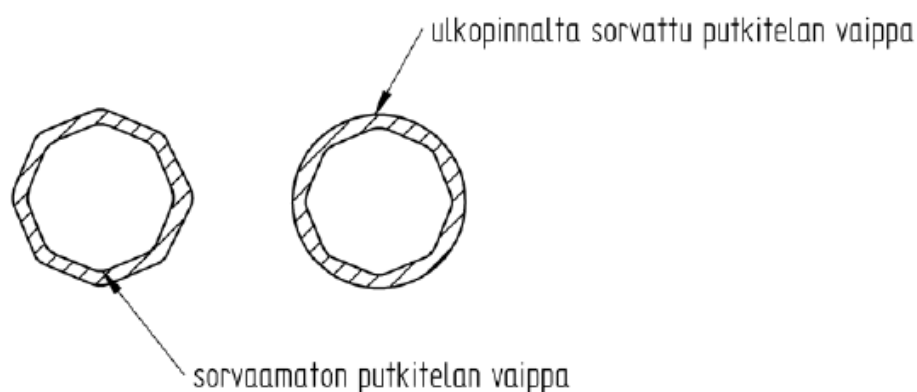
KUVA 13. Telavaipan putkiaihion valmistusvaiheet. (Forsberg, 2006, 14.)

Käytävissä olevasta konekannasta sekä telavaipan pituudesta, halkaisijasta ja seinämnpaksuudesta riippuu, kuinka monesta osasta vaippa valmistetaan. Kuvassa 14 on vaihtoehtoisia levyrakenteisen telavaipan aihionvalmistustapoja. (Pullinen ym. 1997, 16.)



KUVA 14. Vaihtoehtoisia rakennevaihtoehtoja levyrakenteisen telavaipan aihionvalmistuksessa. (Pullinen ym. 1997, 16.)

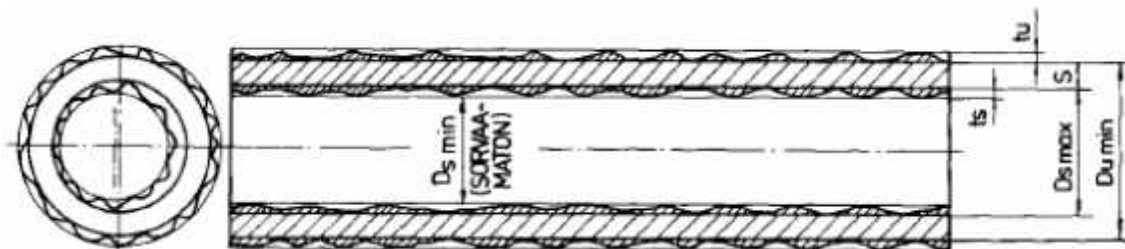
Kun telavaippa valmistetaan ilman sisäsorvausta, aihionvalmistuksella on ratkaiseva merkitys vaipan valmistusvaiheessa syntyviin seinämän paksuusvaihteluihin. Rullamuovauksessa tai taitutuksessa telavaippaan jäävät geometriavirheet aiheuttavat vaipan ulkopinnan sorvauksessa seinämän paksuusvaihtelua. Valmistettaessa telavaippa hitsaamalla useammasta osasta vaippaan syntyy hitsausjännitysten seurauksena muodonmuutoksia. Myös vaippaan hitsauksessa syntyneet muodonmuutokset aiheuttavat sorvauksessa seinämän paksuusvaihtelua kuvan 15 mukaisesti. (Pullinen ym. 1997, 16–17.)



KUVA 15. Aihion kahdeksankulmaisuudesta aiheutuva telavaipan seinämän paksuusvaihtelu vaipan ulkopinnan sorvauksessa. (Pullinen ym. 1997, 17.)

Telavaipan seinämän paksuusvaihtelu ja ympyrämuotoisuusvirhe saadaan teoriassa poistettua sorvaamalla vaippa-aiho sisä- ja ulkopinnasta. Sisäsorvaus on kuitenkin valmistusteknisesti vaativa, kallis ja hidas valmistusvaihe. Jos sisäsorvaus jätetään pois, syntyy telavaippaan seinämän pak-

suusvaihteluita kuvan 16 mukaisesti, kun vaipan ulkopinta sorvataan ympyrämäiseksi. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että sisäsorvaus voidaan jättää pois tietyin edellytyksin, jos vaipan geometria tiedetään jo valmistusvaiheessa. (Forsberg, 2006, 17.)



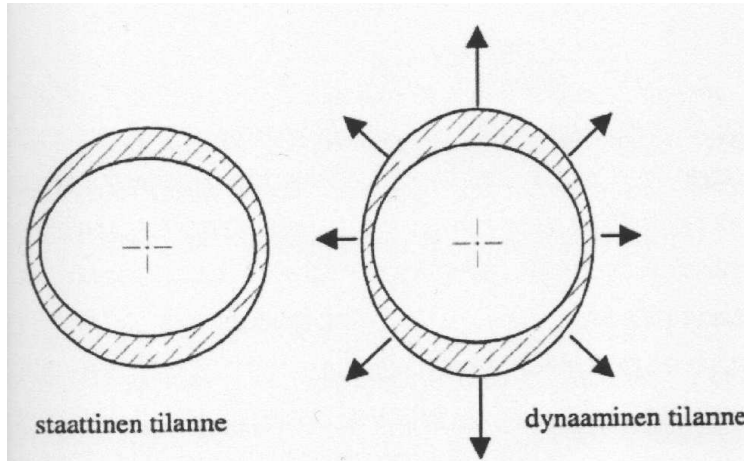
KUVA 16. Periaatekuva telavaipan ulko- ja sisäpinoista ennen vaipan sorvausta. (Forsberg, 2006, 18.)

Seinämän paksuusvaihtelu aiheuttaa telavaipassa sekä taivutusjäykkyyssvaihtelua että kehänsuuntaista jäykkyyssvaihtelua. Taivutusjäykkyyssvaihtelu on merkittävä telan puolikriittisen häiriön aiheuttaja. Telavaipan massa on tavallisesti reilusti yli puolet koko telan massasta, joten vaipan seinämän paksuusvaihtelu voi olla merkittävä telan dynaamisen epätasapainon aiheuttaja. Telavaipan poikkileikkaustason painopiste ja sen epäkeskeisyys telan pyörimisakselin suhteen voidaan laskea mitatun seinämänpaksuustiedon perusteella. Koko telaa kuormittava keskipakovoima telan pyörimisnopeuden funktiona voidaan approksimoida kaavan 4 avulla, kun telavaipan poikkileikkaustasojen epäkeskeiset massajakaumat ja niiden epäkeskeisyydet tunnetaan. (Pullinen ym. 1997, 17.)

4.6 Telavaipan kuorimuodon muutos

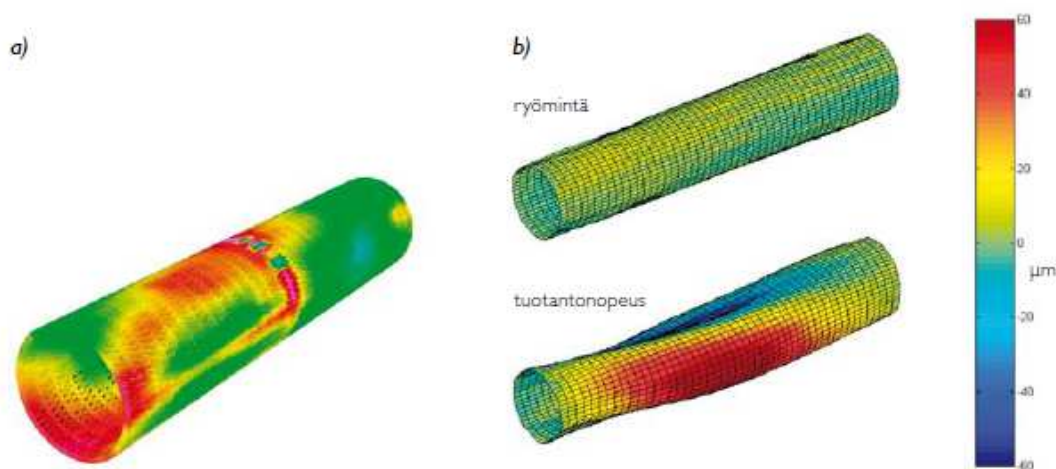
Seinämän paksuusvaihtelusta johtuen vaipan kehälle syntyy erisuuruisia keskipakovoimia, jotka aiheuttavat vaipan säteen suunnassa epätasaisen kuormitusjakauman. Oletetaan, että telavaipan poikkileikkauksen ympyrämäisyysvirhe on pieni telan ollessa pysähdyksissä. Seinämän paksuusvaihtelu on tässä tarkastelussa vaipan vastakkaisilla puolilla, jolloin se ei aiheuta telan staattista epätasapainoa. Telan pyörimisnopeuden kasvaessa vaipan epätasainen kuormitusjakauma kasvaa, minkä seurauksena vaipassa tapahtuu kuorimuodon muutoksia. Kuorimuodon muutoksista johtuen telavaipan poikkileikkauksen ympyrämäisyysprofiili muuttuu lisäten vaipan ympyrämäisyysvirhettä kuvan 17 mukaisesti. Vaipan ympyrämäisyysvirheen suureneminen näkyy telan heittona, jolloin telan dynaamisen taipuman ja laakeroinnin pyörimisvirheen suhteellinen vaikutus

telan heitossa voi jäädä lähes merkityksettömäksi. Telavaipassa tapahtuviin kuorimuodon muutoksiin vaikuttaa myös vaipan pituussuuntainen hitsisauma. (Pullinen ym. 1997, 18.)



KUVA 17. Telavaipan poikkileikkauksen ympyrämuotoisuuden muuttuminen kuorimuodon muutosten seurauksena. (Pullinen ym. 1997, 18.)

Kuvassa 18 a on esitetty erään vastatelan ultraäänellä mitattu seinämän paksuusvaihtelu, jossa havaitaan ensinnäkin telavaipan hitsattu rakenne sekä toisen pään systemaattinen seinämän paksuusvaihtelu. Kuvassa 18 b on esitetty vastatelan dynaamisen geometrian mittaustulos, kun ulkopinnan staattiselta geometrialta kelvollinen tela laitetaan paperikoneeseen. Suuresta pyörimisnopeudesta johtuva keskipakovoima pullistaa telan vaippaa paksummista kohdista. (Promaint 2008, hakupäivä 7.2.2012.)

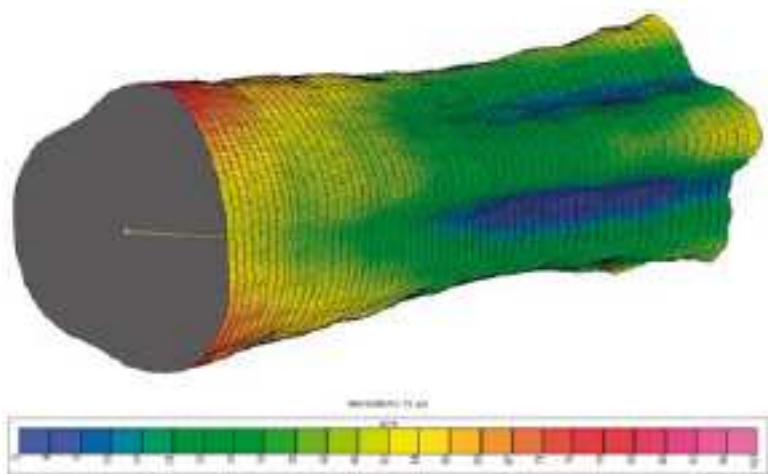


KUVA 18. a) Kuvassa ultraäänimittaustulos vastatelan seinämän paksuusvaihtelusta. b) Vastatelan käyttäytyminen paperikoneessa. Ylempi kuva kuvaa telan staattista geometriaa, joka on mitat-

tu ryömintänopeudella. Alempi kuva on mitattu tuotantonopeudella, jolloin dynaaminen ympyrä-
mäisyysvirhe on yli 100 μm . (Promaint 2008, hakupäivä 7.2.2012.)

4.7 Laakeroinnin pyörimistarkkuus

Laakeroinnin pyörimistarkkuudella tarkoitetaan sitä liikerataa, jota pitkin akselin keskipiste liikkuu telan pyöriessä. Laakeroinnin pyörimisvirheet vaikuttavat telan heittoon ja aiheuttavat herätteitä telaan. Laakeroinnin pyörimistarkkuus vaikuttaa myös telan ympyräjäykkyyteen hiottaessa telaa omilla laakereillaan. Laakeroinnin pyörimisvirheestä johtuva telan keskipisteen hiomakiven suuntainen liikekomponentti kopioituu telan ympyräjäykkyyksiksi. Kuvassa 19 on havaittavissa pyörimisvirheet hiottaessa tela omilla laakereillaan telahiomakoneessa. (Pullinen ym. 1997, 19.)



KUVA 19. Laakeroinnin ympyräjäykkyyden virhe. Toisen pään laakerointi on aiheuttanut kolmikul-
maisuuksia ja toisen pään laakerointi viisikulmaisuuksia. (Promaint 2008, hakupäivä 7.2.2012.)

4.8 Muut tekijät

Telan päädyn jäykkyydellä tarkoitetaan tässä työssä telan päätykonstruktion, akselin ja laake-
roinnin jäykkyyttä. Telan päädyn jäykkyys vaikuttaa telan keskikohdan dynaamiseen taipumaan.
Telan päädyn jäykkyyden vaikutuksesta telan ominaistajuuteen voidaan todeta seuraavaa:

- Päädyn akselin pituuden kasvattaminen aiheuttaa telan ominaistajuuden alenemista.
- Päädyn massan lisääntyessä 5 %:sta 35 %:iin vaipan massasta alenee telan ominaistaa-
juus noin 2–2,5 % laakeroinnin ollessa jäykkä ja noin 7–10 % laakeroinnin ollessa jous-
ta.
- Laakerijouston vaikutus telan ominaistajuuteen on voimakasta. (Pullinen ym. 1997, 20.)

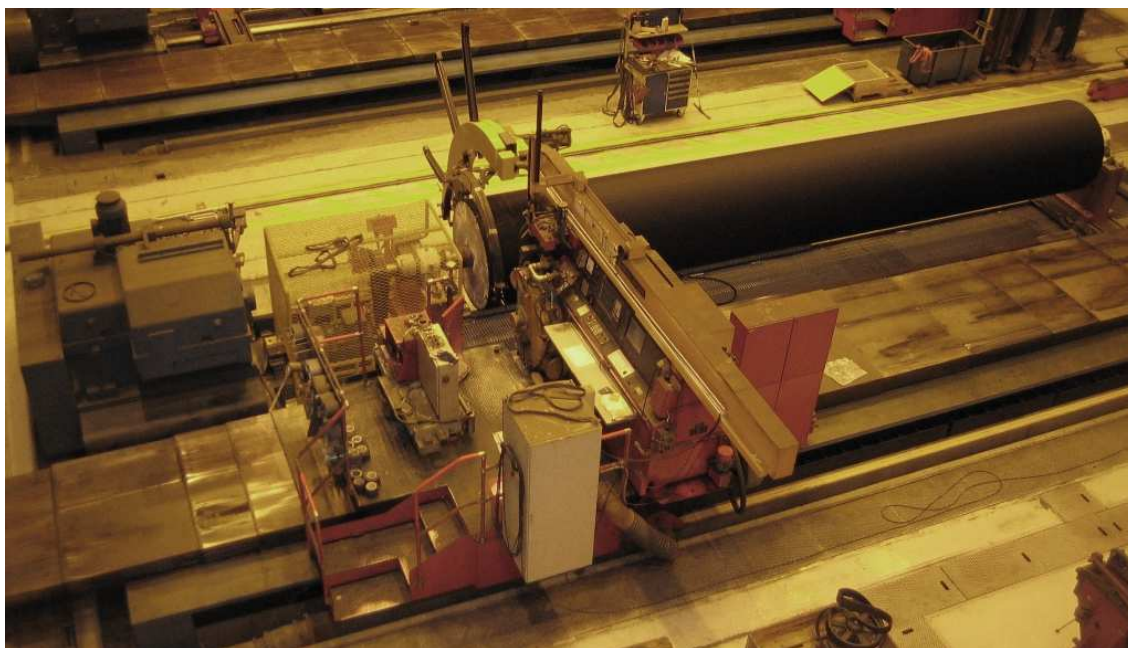
Telan tuennan jäykkyydellä tarkoitetaan sen asennusalustan jäykkyyttä. Päällystysaseman rungon jäykkyydellä tarkoitetaan sen asennusalustan jäykkyyttä. Päällystysaseman rungon jäykkyys vaikuttaa vastatelan dynaamiseen käyttäytymiseen. Mikäli runko on oleellisesti jäykempi suhteessa itse telakonstruktioon, voidaan olettaa, ettei sillä ole merkittävää vaikutusta telan dynaamiseen käyttäytymiseen päällistysajan aikana. Mikäli päällystysaseman rungossa esiintyy kuitenkin huomattavaa joustoa, on sen vaikutus otettava huomioon tutkittaessa vastatelan dynaamista käyttäytymistä. (Pullinen ym. 1997, 20.)

Telan voimansiirto aiheuttaa telaan ulkoisia herätteitä. Käyttävän moottorin käynnin epätasaisuus voi aiheuttaa voimansiirtoakselissa vääntöväärähtelyä. Käytettäessä vääntöjäykkiä kytkimiä, kuten hammaskytkimiä, siirtyvät voimansiirtoakselin mahdolliset vääntöväärähtelyt herätteiksi telaan. Voimansiirron linjausvirhe ja voimansiirtoakselin epätasapaino aiheuttavat myös herätteitä. Linjausvirhe voi olla joko säteissuuntaista virhettä tai kulmavirhettä. Linjausvirheen vaikutuksesta syntyvä heräte riippuu käytetystä kytkintyyppistä ja sen taajuus on tavallisimmin kaksi - kuusi kertaa telan pyörimistaajuus. Vastatelan dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttavat myös paperirata ja kaavinterä. (Pullinen ym. 1997, 20.)

Muihin tekijöihin kuuluu mielestäni myös lämpötila. Telahallissa, missä vastatelojen dynaaminen mittaus ja 3D-telahionta suoritetaan, lämpötila on noin +22 astetta. Paperinpäällistyskoneilla vastatelojen lämpötilat mitattiin jokaiselta neljältä päällistysasemalta 17.01.2012, kun päällistyskoneet olivat tuotannossa. Vastateloista otettiin lämpötilamittaukset kolmesta eri kohdasta, hoitopäästä, keskeltä ja käyttöpäästä. Telojen lämpötilajakauma ei ollut tasainen. Vastatelojen lämpötilojen keskiarvoksi saatiin PPK6:lla +51 astetta ja PPK7:lla +45 astetta. Lämpötiloista tarkemmin on esitetty liitteessä 9.

5 DYNAAMINEN MITTAUS JA 3D-KOMPENSOINTIHIONTA

Vastatelojen staattinen ja dynaaminen mittaus suoritetaan siihen tarkoitettulla Hybrid Dynatest™-mittalaitteella telahiomakoneessa. Efora Oy:llä on Oulussa Waldrich Siegen WS 3 CPT -telahiomakone, joka on hankittu vuonna 1997. Teladynamiikan mittauslaitteisto ja telahiomakoneen 3D-työstönohjausjärjestelmä on RollResearch International Ltd:n valmistama. Telahiomakoneen työstönohjausjärjestelmä on modernisoitu vuonna 2003 ja teladynamiikan mittauslaitteisto on hankittu vuonna 2007. PPK6:n vastateloille teladynamiikan mittaus suoritetaan aina, kun tela saapuu uudelleen pinnoitukselta. PPK7:n vastateloista viidelle on tehty teladynamiikan mittaus tähän mennessä. Mittauksen jälkeen telasta saadaan geometrinen hiontakäyrä, joka syötetään käänteisesti hiomakoneella olevalle Hybrid GrindControl™-3D-työstönohjausjärjestelmälle. Tässä luvussa selvitetään pääperiaatteet telahiomakoneista, mittauksesta ja vastatelojen 3D-telahionnasta. Kuvassa 20 Waldrich Siegen WS 3 CPT -telahiomakone on aloittamassa mittaus-



KUVA 20. Waldrich Siegen WS 3 CPT -telahiomakone.

5.1 Telahiomakoneet

Paperikoneen telojen hiontaan käytetyt telahiomakoneet ovat kooltaan suuria koneyksiköitä. Telahiomakoneen vaatima tilantarve on noin 3,5 m – 8 m x 15 m – 22 m ja massa 50 – 130 tonnia. Telahiomakone asennetaan yleensä raskaan betoniperustuksen päälle, joka on vielä usein eristetty ympäristöstä tulevilta värähtelyiltä erillisin jousin. Koneeseen liittyy aina myös jäähdytysnestejärjestelmä, johon kuuluu säiliö, suodatinlaitteet ja saostusallas. (Kojonen 2003, 14.)

Telahiomakoneen pääosat ovat erilliset johteet hiomakelkkaa ja työkappaleita varten, karalaatikko työkappaleen käyttökoneistoiheen, työkappaleen kannatuskelkat ja tukipylykät, kärkipylkkä sekä hiomakelkka syöttöluisteineen ja hiomalaikka käyttöineen. Telahiomakoneella on pystyttävä säätämään portaattomasti hiomalaikan ja työkappaleiden pyörimisnopeuksia sekä hiomakelkan poikkittais- ja pitkittäisliikettä. (Kojonen 2003, 14.)

5.1.1 Waldrich Siegen WS 3 CPT -telahiomakone

Waldrich Siegen -telahiomakoneen päämitat ovat taulukossa 3.

Taulukko 3. Waldrich Siegen -telahiomakoneen päämitat. (Waldrich Siegen 1997, 9–13.)

Päämitat	Waldrich Siegen 3 CPT	
Koneen pituus	mm	21 400
Koneen leveys	mm	7600
Kärkiväli	mm	14 000
Työkappaleen maksimimassa -omilla laakereilla -tukipylykissä	kg	85 000 70 000
Maksimi hiontapituus	mm	14 000
Valmistusmaa- ja vuosi	Saksa	1997

Waldrich Siegen -telahiomakoneen ominaisuudet ovat taulukossa 4

Taulukko 4. Waldrich Siegen -telahiomakoneen ominaisuudet. (Waldrich Siegen 1997, 9–13.)

Ominaisuudet
Asemahionta
Virtahionta
Negatiivinen ja positiivinen bombeeraus
CNC-käyrät
Viistehionta
Otsapintojen hionta
Uran jysintä
Nelipistemittaus
3D-työstönohjausjärjestelmä
Superfinish nauhahionta
Dynatest™ mittaus

5.1.2 Rungon, johteiden, jäykkyyden ja suoruuden merkitys

Haluttuihin mitta- ja muototarkkuusvaatimukseen pääseminen edellyttää, että telahiomakoneen rungot ovat rakenteeltaan kaksoisrunkoisia ja jäykkiä. Lisäksi rungon johteiden tulee olla suorina ja keskenään yhdensuuntaisia. Pienet vertikaaliset poikkeamat eivät ole ratkaisevia, kun taas horisontaaliset poikkeamat hiomakelkan johteissa aiheuttavat kaksinkertaisen virheen telan halkaisijamittaan. Rungon johteet on yleensä rakennettu kiilakenkien päälle siten, että niiden suoruutta pystytään säätämään. Telahiomakoneen vakaan toiminnan kannalta tulee rungon jäykkyys olla riittävän suuri, sillä työstön aikana ilmenevät värähtelyt voivat johtua koneen liian pienestä jäykkyydestä. (Kojonen 2003, 15–16.)

5.1.3 Telahiomakoneen eri värähtelyt, perustus ja sijoitus

Ulkopuolisia värähtelyitä voi telahiomakoneeseen johtua esimerkiksi paperikoneen käynnistä tai siltanosturien kulusta. Näiden värähtelyjen eliminoimiseksi on telahiomakoneen asennusalustana käytettävä järeää, kaikkiin suuntiin jäykkää teräsbetonikappaletta, joka vielä eristetään ympäristöstään erillisten joustinkappaleiden avulla. Joustinkappaleiden jousivakio tulee mitoittaa koneen

ja perustuksen massa suhteuttaen siten, että rakennuksessa esiintyvät värinäherätteet vaimevat riittävästi eivätkä pääse vaikuttamaan haitallisesti hiomakoneen toimintaan. Paperitehtaissa on mitattu rakennuksista alhaisia 3 – 5 Hz: taajuuksia. (Kojonen 2003, 16.)

Ulkoisten värähtelyjen lisäksi telahiomakoneessa itsessään on värähtelyitä herättäviä lähteitä. Värähtelyitä aiheuttavat voimat johtuvat yleensä epätasaisesta hihnavedosta, käyttömootoreiden vääntömomenttien aaltoilusta, laakerihäiriöistä sekä epätasapainoisesta että tylsästä hiomalaikasta. Hiomakoneen sijoituksen valinnassa paperitehtaalla on huomioitava tasalämpöisyys, koska jo muutaman asteen lämpötilavaihtelu voi aiheuttaa suuria virheitä telahionnassa. Myöskään auringon säteily tai voimakkaat ilmavirtaukset eivät saa kohdistua hiomakoneeseen tai perustukseen. (Kojonen 2003, 17.)

5.2 Telahiomakoneiden mittaus- ja ohjausjärjestelmien kehitys

Telahiontajärjestelmät ovat kehittyneet kolmessa vaiheessa, joita ovat hiomakoneen johdevirheen kompensointi 1990-luvun alkupuolella, telojen pyörimisvirheen kompensointi staattisessa tilassa 1990-luvun loppupuolella ja telojen optimointi prosessiolosuhteisiin 2000-luvulla. (Kojonen 2003, 18.)

5.2.1 Hiomakoneen johdevirheen kompensointi

Ensimmäiset järjestelmät tulivat käyttöön 1990-luvun alkupuolella ja niillä pystytään korjaamaan telahiomakoneen johdevirheen aiheuttama telan halkaisijaero tietokoneavusteisesti. Tämän kompensointijärjestelmän avulla tela voidaan hioa huomattavasti hiomakoneen mekaanista tarkkuutta paremmaksi. (Kojonen 2003, 18.)

5.2.2 Telojen pyörimisvirheen kompensointi staattisessa tilassa

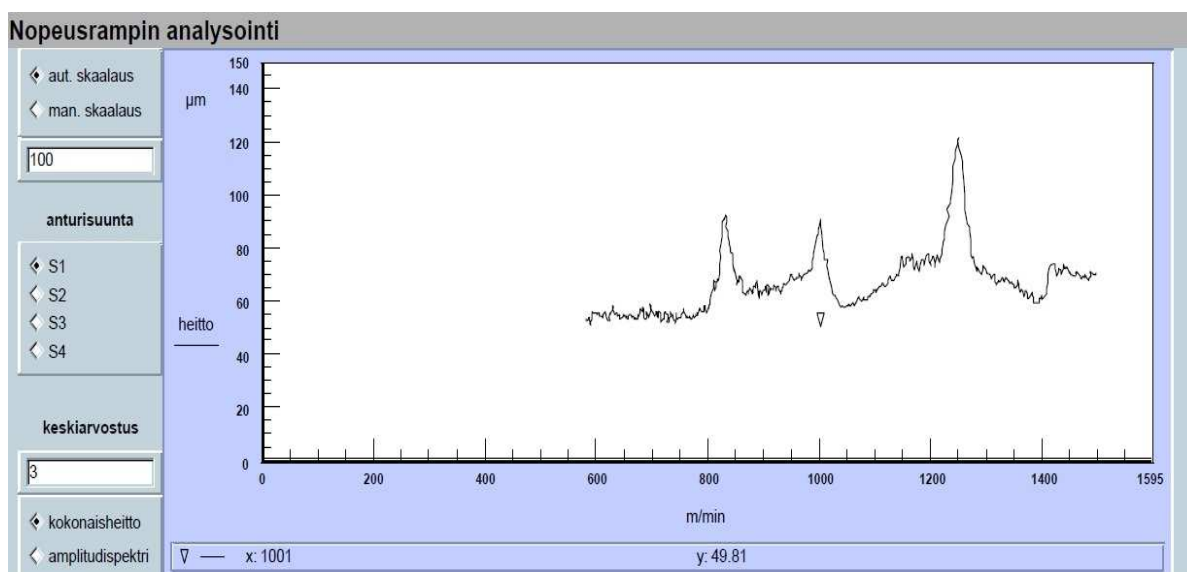
3D-ohjaus- ja mittausjärjestelmällä voidaan johdevirheen lisäksi korjata myös telan ympyrämuotoisuusvirhe. Ohjausjärjestelmä pystyy erottamaan telan pyörimiskeskion liikkeen ja ympyrämuotoisuusprofiilin toisistaan. Näiden tietojen avulla telasta saadaan muodostettua kolmiulotteinen malli, jonka perusteella koneistava elin liikkuu sekä aksiaalisuunnan että telan pyörähdyskulman funktiona ja näin telat voidaan hioa omilla laakereillaan. Ensimmäinen 3D-telahiomakone otettiin käyttöön vuonna 1999 Myllykoski Paper Oy:ssä. 3D-telahiomakoneella tela saadaan koneistettua erittäin tarkasti haluttuun geometriaan staattisessa tilassa. (Kojonen 2003, 18–19.)

5.2.3 Telojen optimointi prosessiolosuhteisiin

3D-ohjauksjärjestelmällä tela voidaan koneistaa siten, että se toimii optimaalisesti käyttöolosuhteissa. Käytännössä tämä tarkoittaa telan koneistamista siten, että telan muoto on mahdollisimman lähellä ideaalisylinteriä prosessiolosuhteissa. Tela voidaan koneistaa normaalisti 3D-ohjauksella, mutta koneistus edellyttää kuitenkin mittausinformaatiota telan dynaamisesta käyttäytymisestä prosessiolosuhteissa. Tällä tekniikalla on tehty ensimmäinen koesarja Myllykoski Paper Oy:ssä päällystysasemien vastateloille ja päästy hyviin tuloksiin. (Kojonen 2003, 19.)

5.3 Dynatest™-mittalaite

Dynatest™-mittalaitteella mitataan telan rakenteeseen, laakerointiin ja tuentaan liittyviä dynaamisia ilmiöitä, kuten telan ympyrämäisyyttä, dynaamista taipumaa ja resonanssivärähtelyjä. Mittaus perustuu monipistemenetelmään, jossa käytetään kosketuksettomia laserantureita. Mittauksen aikana telan pyörimisnopeus vaihtelee ryömintänopeudesta tuotantonopeuteen. Teladynamiikan mittauksen perusteella voidaan analysoida muun muassa telan dynaamisen taipuman ja ympyrämuutoksen suuruus ja suunta. Muita analysointitoimintoja ovat heitto halutussa suunnassa, heiton jako harmonisiin komponentteihin, dynaaminen ympyrämäisyys sekä telan pyörimiskeskion liike. Lisäksi laitteella voidaan tehdä kuvassa 21 näkyvä nopeusramppimittaus, jossa mitataan telan heittoa jatkuvasti telan pyörimisnopeuden joko laskiessa tai noustessa tasaisesti. Mittauksella nähdään telan resonanssikohdat ja muut jaksolliset herätteet, joita teladynamiikan mittauksessa ei välttämättä nähdä. (RollResearch 2007, 5–29.)



KUVA 21. Vastatelan 1745 kriittinen ajonopeus näkyy kuvassa 1250 m/min kohdalla.

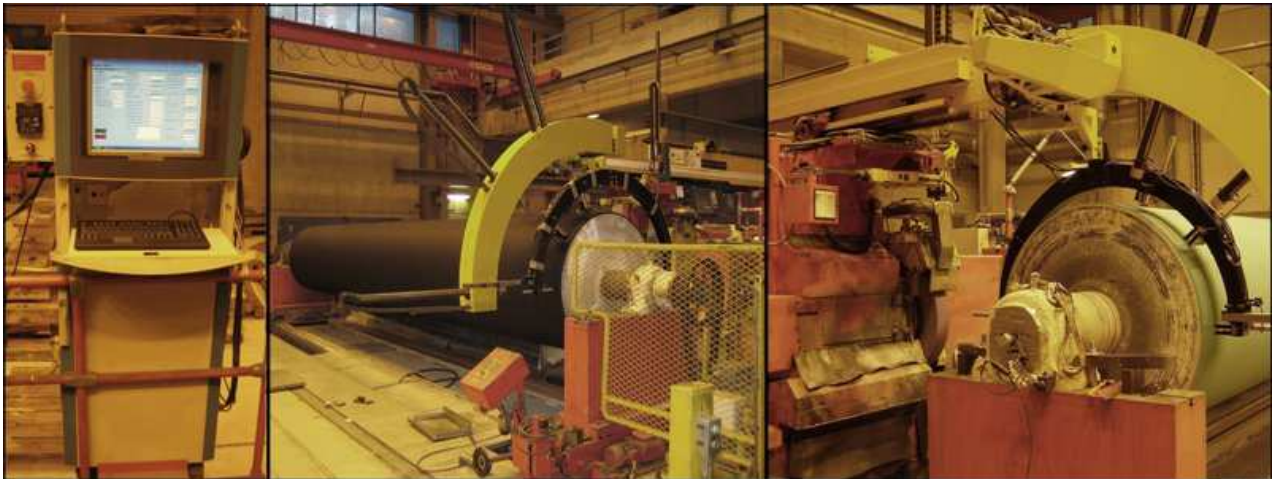
5.3.1 Hybrid–menetelmä ja laser–nelipistemittalaite

Mittalaitteen käyttämän Hybrid–nelipistemenetelmän ansiosta sillä voidaan mitata telan todellinen ympyrämäisyysvirhe. Teknillisen korkeakoulun Koneensuunnittelun laboratoriossa kehitetty Hybrid–menetelmä on monianturimenetelmä, jolla lasketaan telan ympyrämäisyysprofiili neljän anturin heittosignaalin perusteella. Menetelmässä on yhdistetty vastakkaisilla antureilla toteutettu kahden pisteen halkaisijamittausmenetelmä ja ympyrämäisyyden mittaamiseen käytetty Ozonon kolmipistemenetelmä. Kahden pisteen halkaisijamittausmenetelmässä telan pyörimiskeskiön liikkeellä ei ole merkittävää vaikutusta ympyrämäisyysprofiilin parillisiin aaltomuotoihin. Ozonon kolmipistemenetelmässä telan pyörimiskeskiön liikkeen vaikutus ympyrämäisyysprofiilin aaltomuotoihin poistetaan summasignaalin painokertoimien avulla. Hybrid–menetelmässä telan ympyrämäisyysprofiilin parilliset aaltomuodot ratkaistaan kahden pisteen halkaisijamittausmenetelmällä ja parittomat aaltomuodot Ozonon kolmipistemenetelmällä. Kun nämä aaltomuodot summataan, saadaan tuloksena telan todellinen ympyrämäisyysprofiili, josta on poistettu telan pyörimiskeskiön liikkeen vaikutus. (Pullinen ym. 1997, 22–23.)

Laser–nelipistemittalaitteessa käytetään samaa mittakaarta kuin Hybrid–mittalaitteessa. Telan heittoa mitataan laser–etäisyysmittalaitteella. Laser–etäisyysmittalaitteessa käytetään sähköoptista anturia, joka lähettää laservaloa mitattavaan kohdepintaan. Etäisyysmittaus perustuu kohdepinnasta heijastuvan laservalon intensiteettimaksimin paikan siirtymiseen anturin havaitsijalla, kun kohdepinnan etäisyys anturin suhteen muuttuu. Tämän kosketuksettoman mittausperiaatteen ansiosta telan kehänopeudelle ei ole rajoituksia, joten laser–nelipistemittalaitteella voidaan mitata sekä kumi- että teräspintaisten telan heittoa ja ympyrämäisyysprofiilia myös paperikoneen normaaleilla ratanopeuksilla. (Pullinen ym. 1997, 24.)

5.3.2 Teladynamiikan mittaus

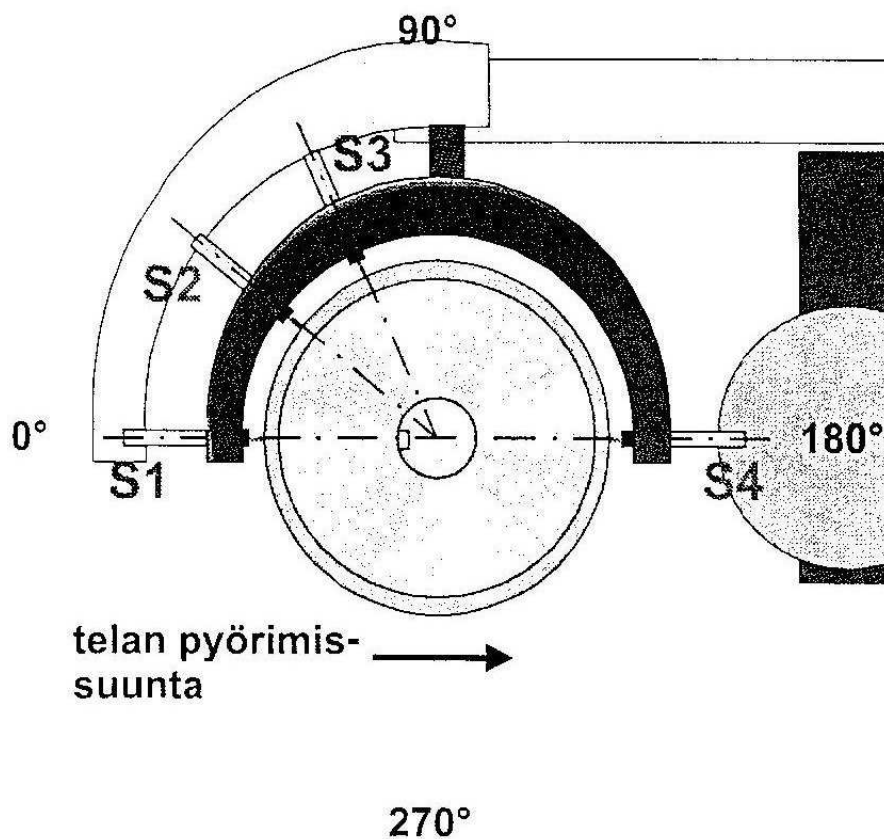
Dynatest™–mittalaitetta ohjataan eri poikkileikkauskohtiin hiomakelkan pitkittäisliikkeellä. Vastatelaan on kytketty erillinen 75 kw:n sähkömoottori hammashihnavälityksellä ja sen pyörimisnopeutta ohjataan portaattomasti taajuusmuuttajalla. Kuvassa 22 on PC-kaappijärjestelmä vasemmalta. Kuvassa oikealla on vastatelan mittaus hiomakoneella käyttö- ja hoitopäästä katsottuna.



KUVA 22. Vastatelan mittaus telahiomakoneella.

Mittalaite on rakennettu PC-kaappijärjestelmään. Mittalaitteen pääosat ovat mittakaari, lasermittausyksikkö, signaalien kytkentäyksikkö sekä tiedonkeruuyksikkö. Lasermittausyksikkö koostuu neljästä laseranturista (S1, S2, S3 ja S4) ja niitä ohjaavista keskusyksiöistä. KytKentäyksikkö koostuu signaalien optoerotuspiirikortista, tiedonkeruukortin kytkentäpaneeleista ja ulkoisista liitännöistä. Tiedonkeruuyksikön muodostaa teollisuus-PC, ohjelmoitava suodatinkortti ja tiedonkeruukortti. Laitteistoon kuuluu myös näyttö, näppäimistö, pulssianturi kiinnittimiseen, laseranturipitimet sekä antureiden jatkokaapelit. (RollResearch 2007, 6.)

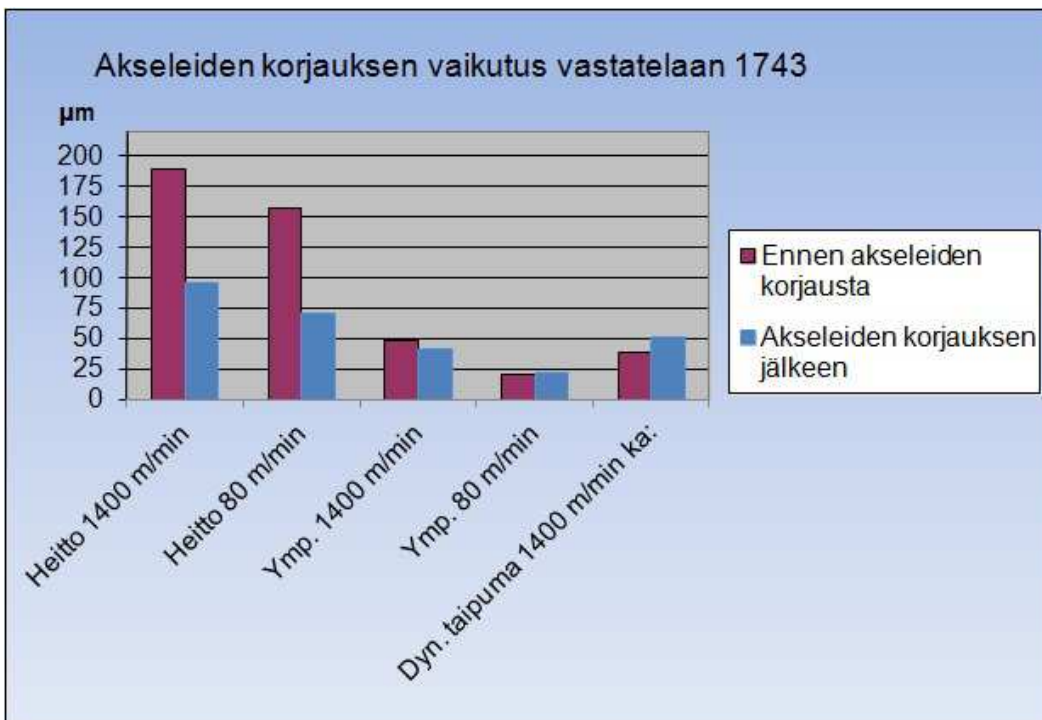
Mittalaitteiston mittakaari on valmistettu hiilikuidusta. Hiilikuitua käyttämällä mittakaaren rakenne saadaan kevyeksi ja jäykäksi. Kevyt rakenne helpottaa kaaren käsittelyä ja jäykkyydellä estetään kaaren taipumisesta aiheutuva virhe mittauksessa. Hiilikudun erittäin pieni pituuden lämpötilakerroin minimoi ympäristön lämpötilanmuutoksen vaikutuksen mittaustulokseen. (Pullinen ym. 1997, 23.) Kuvassa 23 on laserantureiden paikat ja järjestys mittakaareissa.



KUVA 23. Mittakaari ja laserantureiden paikat ja järjestys käyttöpäästä katsottuna. (RollResearch 2007, 16.)

Teladynamiikan mittalaitteella mitataan vastatelan ympyrämuotoisuus geometria laserantureilla koko vaipan matkalta useasta eri poikkileikkauskohdasta. Mittaus suoritetaan usean kierroksen ajan nopeuden ollessa ensin ryöminnällä. Tämän jälkeen vastatelan ratanopeus nostetaan vastaamaan tuotantonopeutta ja suoritetaan mittaus. Hiomakoneen työstönohjauksjärjestelmälle siirrettävälle käänteiselle peruskäyrälle tarvitaan ryömintänopeus ja tuotannollinen ajonopeus, jotta ohjelma osaa laskea kyseisen hiontakäyrän. Samaa hiomakoneelle siirrettyä käänteistä hiontakäyrää käytetään myös seuraavilla kerroilla, kun vastatela saapuu uudelleen hiontaan. Viimeisimmät mittaukset PPK6:n vastateloille ovat tehty vuosien 2008–2011 välillä. PPK7:n vastateloille viimeisimmät mittaukset ovat tehty vuosien 2009–2011 välillä. Yhteenveto vastatelojen staattisista ja dynaamisista mittauksista on liitteissä 1–4.

Alla olevassa kuviossa 1 on vertailu vuonna 2010 tehdystä vastatelan akseleiden korjauksen vaikutuksesta. Kyseessä oli PPK6:n vastatela 1743, jolle tehtiin akseleiden korjaus ja koneistus ulkopuolisella korjaamolla. Telalla suoritettiin dynaaminen ja staattinen mittaus ennen ja jälkeen akseleiden korjausta Dynatest™-mittalaitteella. Kuvioista näkee, että telan heitto on pienentynyt huomattavasti akseleiden korjauksen jälkeen. Ympyrämaisyydessä ja dynaamisessa taipumassa ei ole juuri tapahtunut muutosta parempaan. Mitta-arvot kuvioon on otettu keskeltä vastatelaa. Pikoteknik Oy:n mittauspöytäkirja akseleiden kunnostuksen vaikutuksesta on liitteessä 10.



KUVIO 1. Vastatelan 1743 akseleiden korjauksen vaikutus.

5.4 Vastatelan 3D-kompensointihionta

Aluksi telaa hiotaan rouhintahionnalla ilman korjauskäyriä. Tällöin Hybrid GrindControl™ 3D-työstönohjausjärjestelmä ajaa vain tavoitemuodon eli peruskäyrän mukaista rataa. Eri virheet muun muassa linjausvirhe, johdevirhe ja laakerivirheet kopioituvat telan vaipan geometriavirheeksi. Rouhintaa jatketaan niin kauan, että koko vaipan alueelta lähtee tasaisesti ainetta pois eli hio-
malaikan kuormittavat voimat tasaantuvat ja pienentyvät. Seuraavaksi mitataan geometriavirheet, jotka rouhintahionnassa ovat syntyneet. Niiden perusteella lasketaan jäännösvirhe. 3D-hiontaradan jäännösvirheen laskemiseksi tarvitaan telan akselin suuntaisen halkaisijaeroprofiilin

lisäksi ympyrämäisyysprofiilit telan päistä ja keskeltä. Halkaisijaeroprofiili yhdistetään ympyrämäisyysprofiileihin samassa kulmassa 3D-työstökäyrää muodostettaessa. Kuvassa 24 on havainnollistettu eri mittauskohdat. (RollResearch, 2003, 32.)

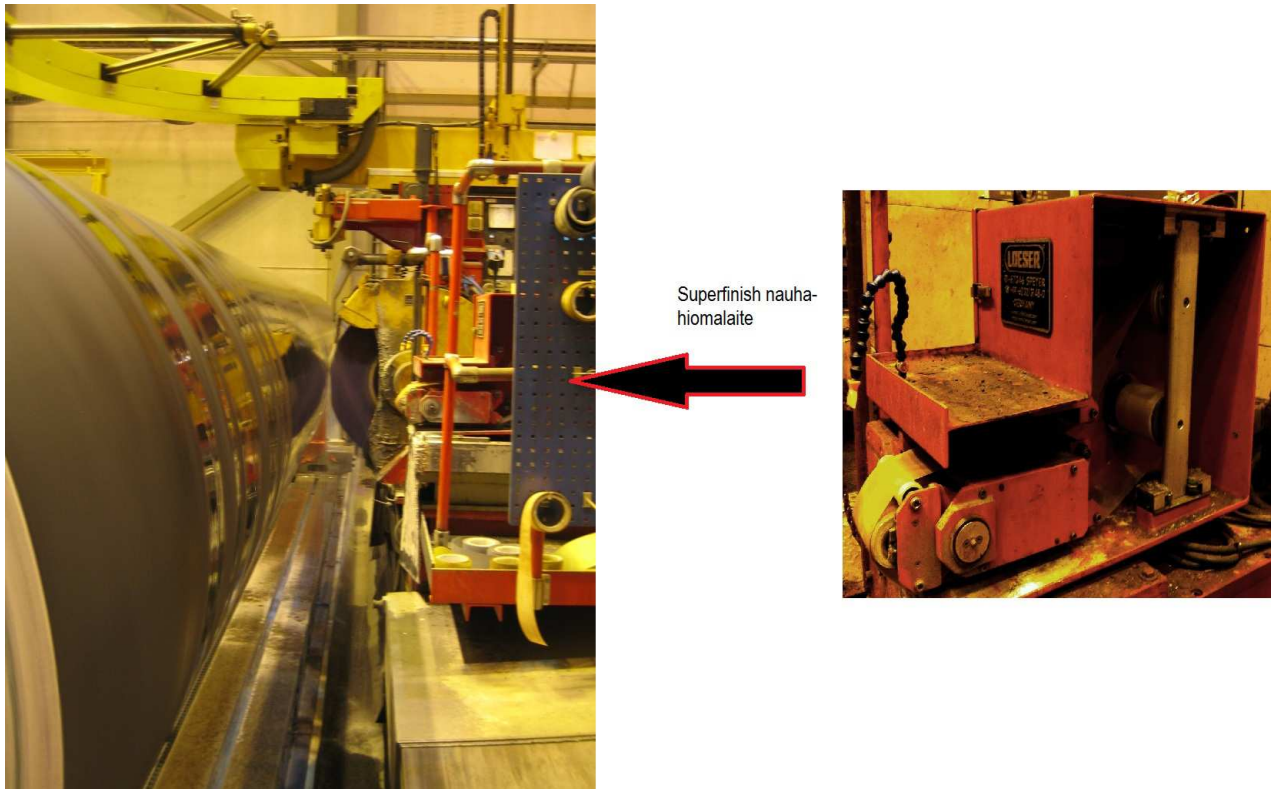


KUVA 24. Halkaisijaeroprofiili sekä ympyrämäisyysprofiilit molemmista päistä ja keskeltä mitattuna. (RollResearch, 2003, 32.)

3D- telahionnassa työstönohjausjärjestelmä ajaa korjauskäyrän mukaista rataa. Tällöin virheiden pitäisi poistua, kun on hiottu riittävästi ainetta pois. Käytännössä hiontatapahtumassa tapahtuvat muutokset ja mittauksen virheet johtavat siihen, että virheet eivät välttämättä poistu kokonaan. 3D-telahionta tehdään aina ensimmäisen rouhinnan jälkeen saatavilla korjauskäyrillä. (Roll-Research, 2003, 32.)

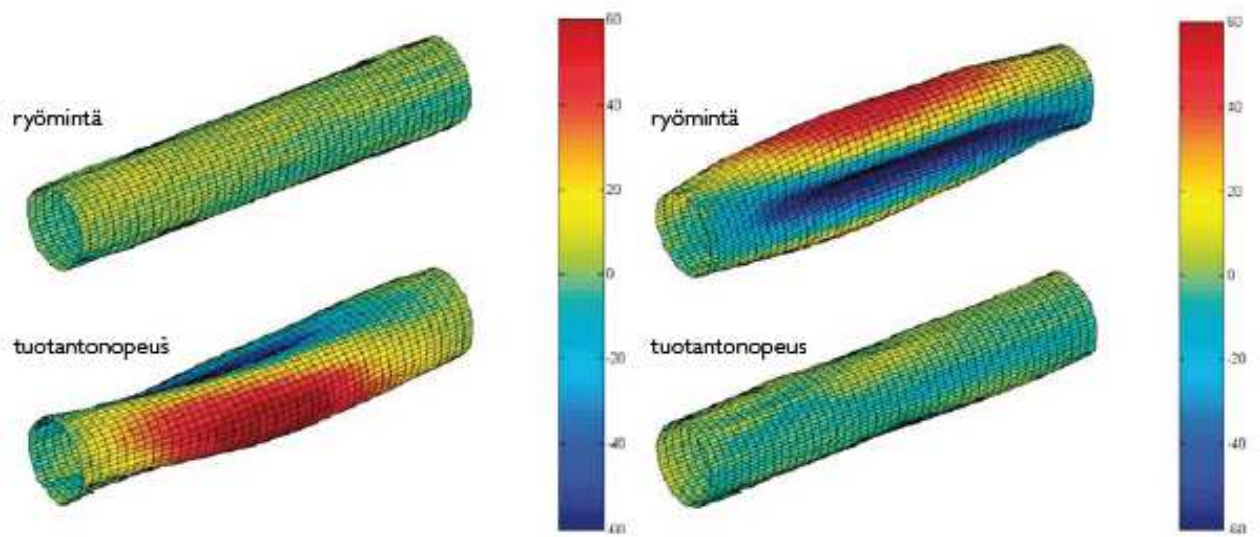
Lopuksi, kun vastatela on vaadituissa halkaisijaero- ja ympyrämäisyystoleransseissa, hiomakivellä hiottu pinta viimeistellään Superfinish–nauhahiomalaitteella halutun pinnankarheuden saavuttamiseksi ja mahdollisen hiomakiven syötönjälkien poistamiseksi. Superfinish–nauhahiomalaite on integroitu telahiomakoneeseen ja sitä ohjataan työstönohjausjärjestelmällä. Kuvassa 25 vastatela hiotaan hiomakivellä ja Superfinish–nauhahiomalaite on oikealla. Hiomakoneelta valmistuvat vastatelat varastoidaan telahallissa olevaan telanpyöritystelineeseen. Telineessä vastatelat pyörivät ennen varsinaista käyttöönottoa päällystyskoneelle. Pinnankarheuden (Ra arvon) vaatimukset PPK6:n ja PPK7:n vastateloilla ovat $1,0 \mu\text{m}$. Vaaditut halkaisijaero- ja ympyrämäisyystoleranssit PPK6:n ja PPK7:n vastateloilla ovat: halkaisijaero $\pm 0,015 \text{ mm}$ ja ympyrämäisyys $0,03 \text{ mm}$. Liitteissä 5–8 on vertailu PPK6:n ja PPK7:n vastatelojen ympyrämäisyys- ja halkaisijaerotoleransseista hionnan jälkeen. Näissä hionnan jälkeen olevissa mitoissa on selkeästi havaittavissa

päälystyskoneiden vastatelojen väliset erot. PPK6:n vastateloille pitää tehdä huomattavasti isompi geometrinen 3D-korjaushionta kuin PPK7:n tarkkuusvastateloille.



KUVA 25. Vastatelan hiontaa hiomakivellä ja oikealla Superfinish–nauhahiomalaite, jota käytetään telan pinnan viimeistelyyn.

Hiomakoneelta valmistunut vastatela ei ole enää perinteisen konepajatoleranssien mukaan ympyrämainen ja suora. Menetelmän periaatteena onkin, että telahiomakoneessa telaan hiottu dynaamiselle muutokselle vastakkainen virhe kompensoituu paperikoneen tuotantonopeudella eli tela pullistuu ympyrämäiseksi ja suoraksi kuvan 26 mukaisesti. (Promaint 2008, hakupäivä 7.2.2012.)



KUVA 26. Vastatelan geometria ryömintä ja ajonopeudella. Vasemmanpuoleisessa kuvassa vastatela on hiottu perinteisesti suoraksi ja ympyrämäiseksi hiomakoneessa. Oikeanpuoleisessa kuvassa vastatelaan on hiottu tuotantonopeuden käännteinen geometria, jolloin telahiomossa soikea tela "pullistuu" ympyrämäiseksi tuotantonopeudella. (Promaint 2008, hakupäivä 7.2.2012.)

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyö tehtiin Efora Oy:lle Oulun tulossyksikköön. Työn tarkoituksena oli tutkia 3D-kompensointihionnan vaikutusta vastatelojen laatuun. Opinnäytetyö sisälsi kirjallista tutkimusta, vastatelojen mittausta sekä 3D-kompensointihiontaa telahiomakoneella ja mittausten tuloksien analysointia. Mielestäni Dynatest®-mittaus ja 3D-kompensointihionta parantavat PPK6:n vastatelojen laatua ja niiden dynaamista käyttäytymistä paperinpäälystyskoneella. Dynatest®-mittaus ja 3D-kompensointihionta eivät ole kuitenkaan aivan optimaalisia siitä syystä, että vastatelojen lämpötilat ja -erot päälystysasemilla ovat isompia kuin telahallissa, missä Dynatest®-mittaus ja telanhionta suoritetaan. Yksi parannuskeino nykyisille vastateloille olisi niiden tasapainotusluokan pienentäminen tarkkuusluokkaan G1. Opinnäytetyön tekemisen aikana selvisi, että kaikki vastatelat eivät jostain syystä ole edellä mainitussa tarkkuusluokassa. Liian suuri epätasapaino aiheuttaa värinää ja dynaamista heittoa, joka on yhteydessä päälystemäärän vaihteluun.

PPK6:n vastatelojen kunnostuksella olisi varmasti vaikutusta niiden staattiseen ja dynaamiseen käyttäytymiseen. Kunnostusmenetelmiä ovat esimerkiksi telavaipan sisäsorvaus kuorimuodonmuutosten pienentämiseksi, telan päätyjen ja akselitappien parantaminen, telan keskitasapainotus, laakerointimuutos kiristysholkki kiinnityksestä esimerkiksi kartioakselille ja telavaipan jäykittäminen keskeltä. Myös kiertorasvavoitelun muuttaminen kiertoöljyvoiteluun pienentäisi todennäköisesti laakereiden lämpötiloja. Tulevaisuuden vaihtoehto olisi korvata PPK6:n vastatelat niin sanotuilla tarkkuusvastateloilla, joissa on muun muassa sisäsorvattu teräsvaippa ja joita jo PPK7:lla käytetään. Toinen tulevaisuuden vaihtoehto olisi hiilikuitukomposiittirunkoiset vastatelat. Hiilikuitukomposiittirunkoisten vastatelojen etuna on kevyt rakenne, korkea lujuus ja jäykkyys, hyvät värähtelynvaimennusominaisuudet ja pienempi lämpölaajenemiskerroin verrattuna teräkseen. Myös hiilikomposiittirunkoisten telojen tasapainottaminen tuotantonopeuteen on helpompaa. Ainoa miinus näiden hankintaan on korkeahko hinta ja se vaatisi isoja investointeja.

PPK7:n vastateloille 3D-kompensointihionnasta ei ole mielestäni niin suurta hyötyä kuin PPK6:n vastateloille. PPK7:n vastatelojen staattinen ja dynaaminen käyttäytyminen mittausten mukaan ovat erinomaisia verrattuna PPK6:n vastateloihin. Kaikki PPK7:n vastatelat eivät ole myöskään tasapainotustarkkuusluokassa G1. Ainoa parannuskeino mielestäni näille vastateloille on pyrkimys tasapainoluokkaan G1.

Opinnäytetyön tekemistä helpotti paljon jo olemassa oleva data vastatelojen staattisesta ja dynaamisesta käyttäytymisestä. Osalle vastateloista tehtiin Dynatest®-mittaus ja 3D-kompensointihionta tämän opinnäytetyön tekemisen aikana. Kuten opinnäytetyöstä käy ilmi, vastatelojen staattiseen ja dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttaa vastatelojen rakenne ja moni tekijä niin telahiomakoneella kuin paperinpäällystyskoneellakin.

LÄHDELUETTELO

Efora Oy. 2012. Efora lyhyesti. Sisäinen lähde. Hakupäivä 7.2.2012

http://worksite.storaenso.com/eforanet/Profiihimme/eforalyhyesti/Sivut/efora_lyhyesti.aspx.

Forsberg Kimi 2006. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Putkitelan kuorimuodonmuutosten mallinnus. Diplomityö. Espoo.

Hägglom–Ahnger Ulla, Komulainen Pekka 2003. Kemiallinen metsäteollisuus II, Paperin ja kartongin valmistus. 3. tarkistettu painos Gummerrus kirjapaino Oy Jyväskylä. ISBN 952-13-1746-9.

Juhanko Jari 2011. Dynamic geometry of a rotating paper machine roll. Doctoral dissertations. Aalto University. Unigrafia Oy Helsinki 2011. ISBN 978-952-60-4363-0.

Kojonen Antti 2003. Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. Tutkimus 3D-telähionnan tuomista hyödyistä. Diplomityö. Oulu.

Lahdelma Sulo 2003. Koneiden kunnan diagnostiikka. Oulun Yliopistopaino 2003.

Lielahi, M., tuotantoinsinööri, StoraEnso, PK6, 2011, keskustelu 7.11.2011. Tekijän hallussa.

Metso. Koulutusaineisto, OptiCoat Jet päällystysasema, mekaanisen kunnossapidon koulutus. 2001.

Niskanen Juhani 1998. 46474S Paperiteollisuuden koneet, Telat. Koneensuunnittelun laboratorio Oulun Yliopisto.

Pokela Kari 2006. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Paperikoneen johtotelojen kunnossapidon kehittäminen. Diplomityö. Espoo.

Promaint. 2008. Telageometria 7/2008. Widmaier Thomas, Juhanko Jari, Kuosmanen Petri. Hakupäivä 7.2.2012 www.promaint.net/downloader.asp?id=3096&type=1.

Pullinen Jukka, Juhanko Jari, Kuosmanen Petri 1997. Kunnostuksen vaikutus vastatelan dynaamiseen käyttäytymiseen. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Koneensuunnittelun laboratorio. Julkaisu nro C 286. Otaniemi. ISBN 951-22-3741-5.

RollResearch Ltd Hybrid DynaTest™. Teladynamiikan mittalaite, käyttöohje 2007. Versio 1.6.

RollResearch Ltd Hybrid GrindControl™ 3D. Hiomakoneen ohjausjärjestelmä, käyttöohje 2003.

SKF Interactive Engineering Catalogue 2001. CD-ROM. Version 2.0.

SKF. Pyörivien koneiden tasapainotus ja dynaaminen käyttäytyminen 2002. Koulutusmateriaali.

StoraEnso Oyj. 2012. Tehdasesittely. Sisäinen lähde. Hakupäivä 7.2.2012

<http://insite.storaenso.com/mills/finland/oulu-mill/tehdasesittely/Pages/yksi-suurimmista-ja-nykyaikaisimmista.aspx>.

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2012. Sähköinen SFS-standardi 4968. Hakupäivä 20.2.2012

<http://sales.sfs.fi.ezp.oamk.fi:2048/sfs/servlets/DownloadServlet?action=getFile&forContract=10218&productId=151784>.

Tekniikan kaavasto 2002. Neljäs painos. Gummerrus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. ISBN 951-9004-74-2.

Valmet. Koulutusaineisto. Päälystyskone, mekaaninen kunnossapito. 1997.

Waldrich Siegen. Valssinhiomakoneen käyttöohjeet, kansio M1. 1997.

LIITTEET

LIITE 1. PPK6:n vastatelojen säteisheitto ja ympyrämäisyys staattisena ja dynaamisena.

LIITE 2. PPK6:n vastatelojen dynaamisen taipuman keskiarvo.

LIITE 3. PPK7:n vastatelojen säteisheitto ja ympyrämäisyys staattisena ja dynaamisena.

LIITE 4. PPK7:n vastatelojen dynaamisen taipuman keskiarvo.

LIITE 5. PPK6:n ja PPK7:n vastatelojen ympyrämäisyys hoitopäästä hionnan jälkeen.

LIITE 6. PPK6:n ja PPK7:n vastatelojen ympyrämäisyys keskeltä hionnan jälkeen.

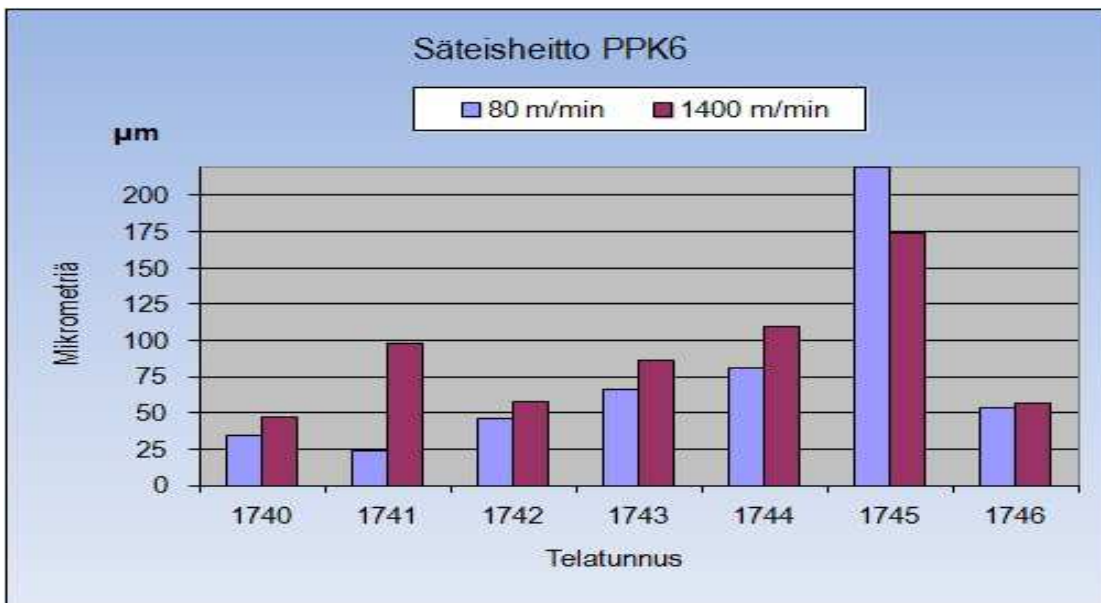
LIITE 7. PPK6:n ja PPK7:n vastatelojen ympyrämäisyys käyttöpäästä hionnan jälkeen.

LIITE 8. PPK6:n ja PPK7:n vastatelojen halkaisijaero keskeltä hionnan jälkeen.

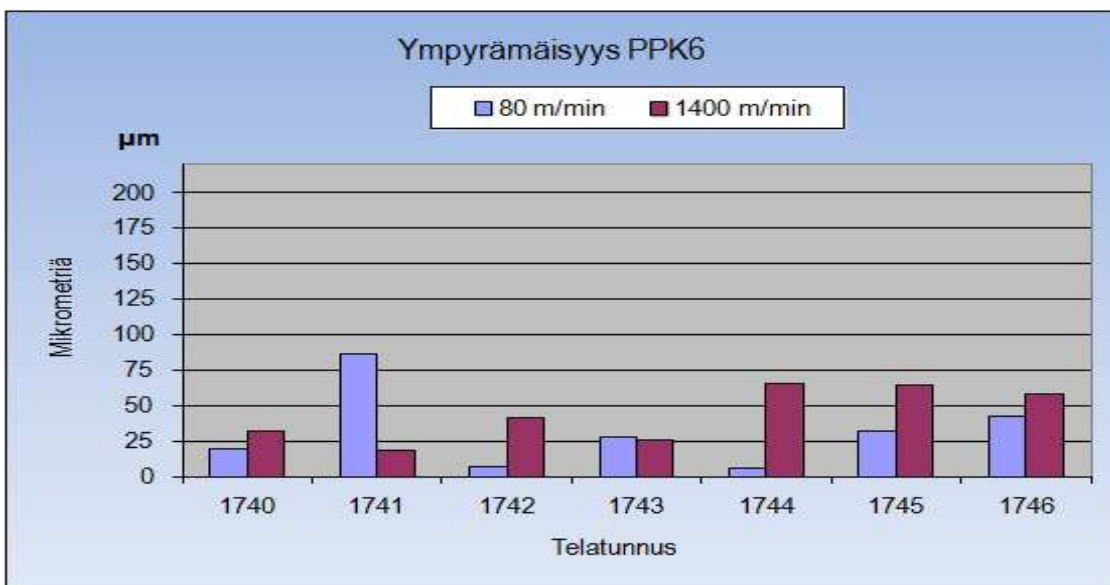
LIITE 9. PPK6:n ja PPK7:n vastatelojen lämpötilat eri päällystysasemilla.

LIITE 10. PPK6:n vastatelan 1743 mittauspöytäkirja akseleiden kunnostuksesta.

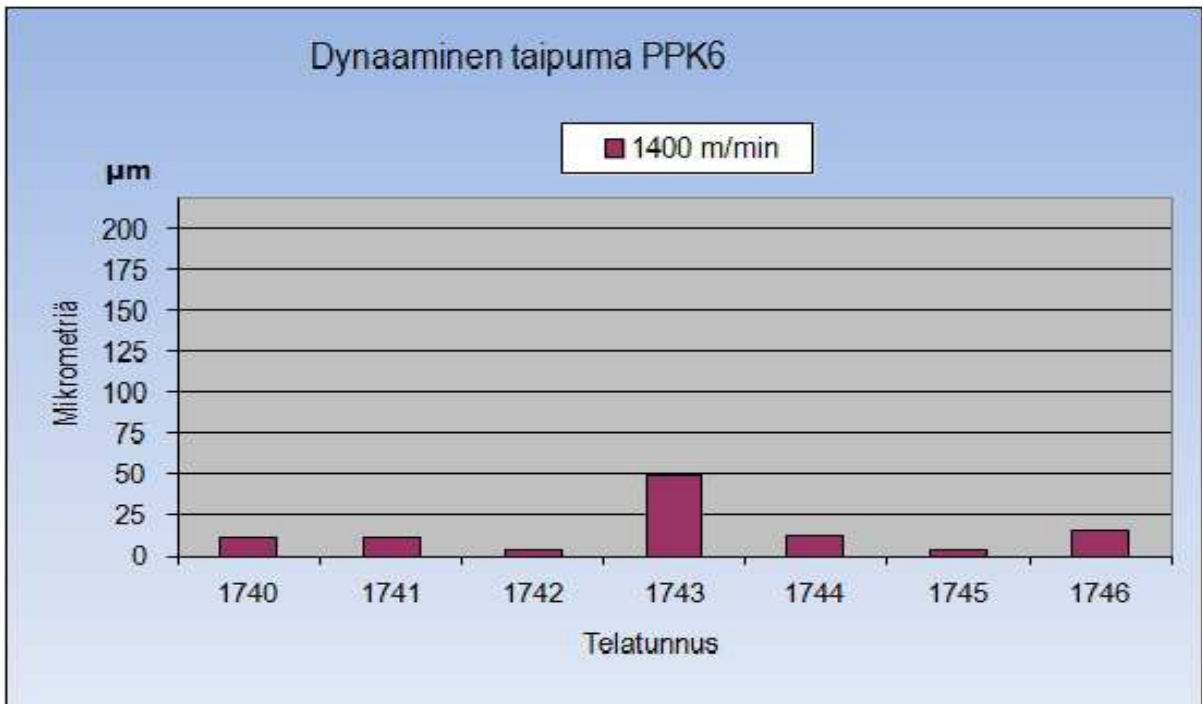
PPK6:n vastatelojen säteisheitto ratanopeudella 80 m/min ja 1400 m/min. Pystyakselilla lukemat ovat mikrometrejä (μm) ja vaaka-akselilla vastatelan numero. Mittaus on suoritettu vastatelan keskikohdasta.



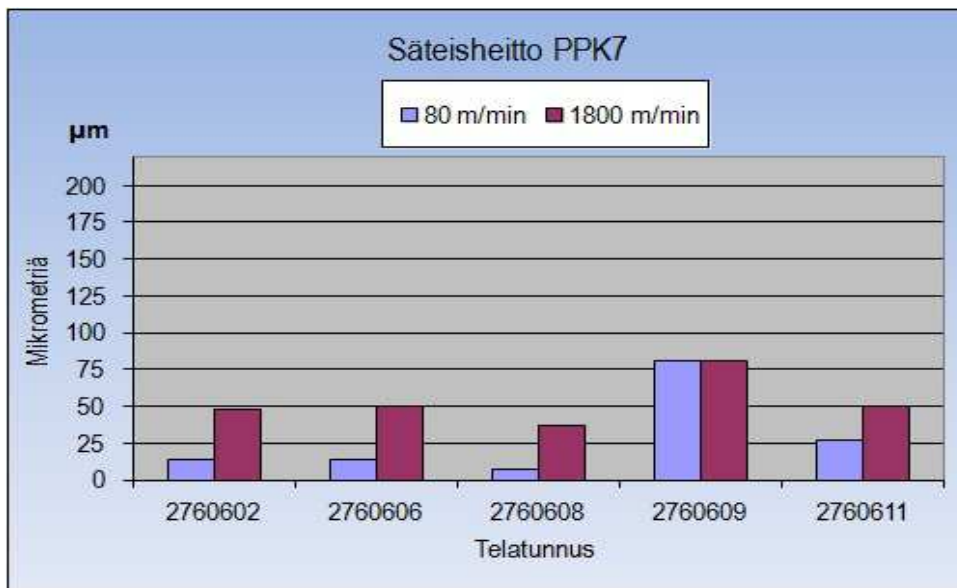
PPK6:n vastatelojen ympyrämäisyys ratanopeudella 80 m/min ja 1400 m/min. Pystyakselilla lukemat ovat mikrometrejä (μm) ja vaaka-akselilla vastatelan numero. Mittaus on suoritettu vastatelan keskikohdasta.



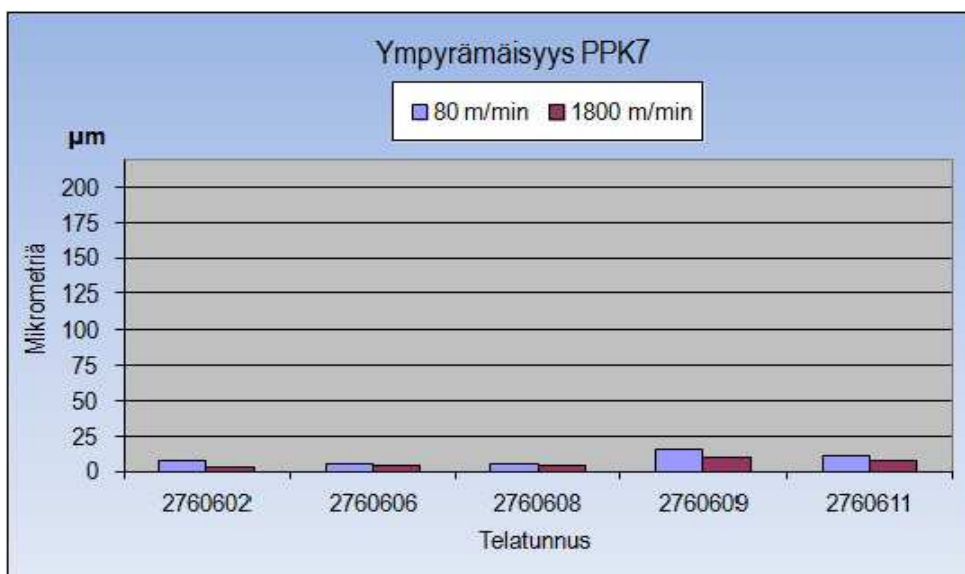
PPK6:n vastatelojen dynaamisen taipuman keskiarvo ratanopeudella 1400 m/min. Pystyakselilla lukemat ovat mikrometrejä (μm) ja vaaka-akselilla vastatelan numero. Mittaus on suoritettu vastatelan keskikohdasta.



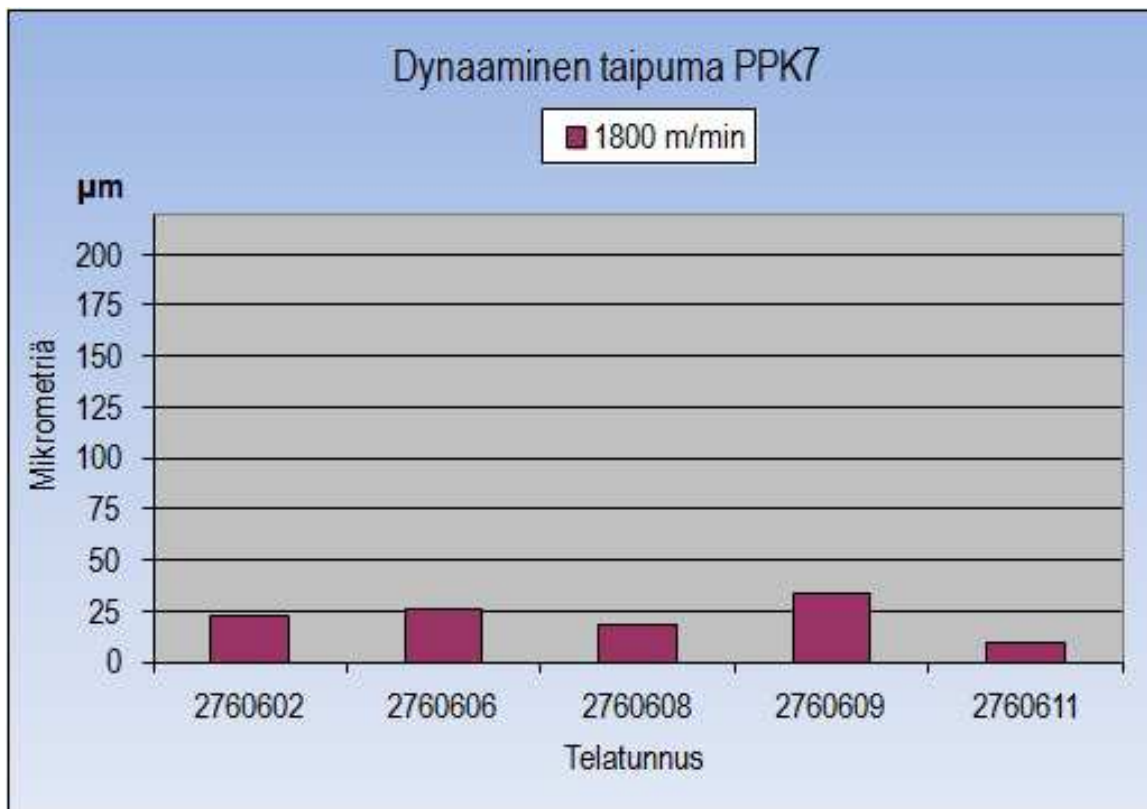
PPK7:n vastatelojen säteisheitto ratanopeudella 80 m/min ja 1800 m/min. Pystyakselilla lukemat ovat mikrometrejä (μm) ja vaaka-akselilla vastatelan numero. Mittaus on suoritettu vastatelan keskikohdasta.



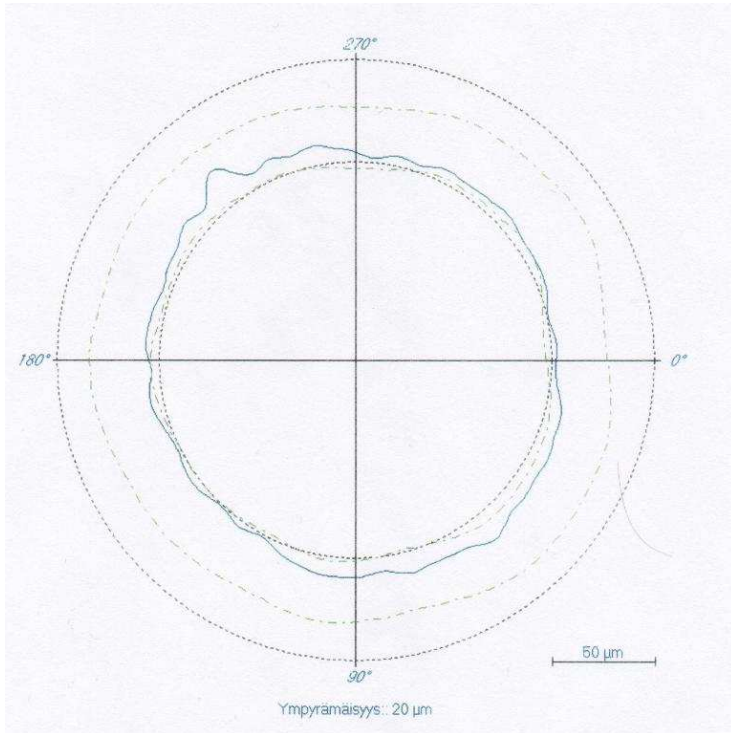
PPK7:n vastatelojen ympyrämäisyys ratanopeudella 80 m/min ja 1800 m/min. Pystyakselilla lukemat ovat mikrometrejä (μm) ja vaaka-akselilla vastatelan numero. Mittaus on suoritettu vastatelan keskikohdasta.



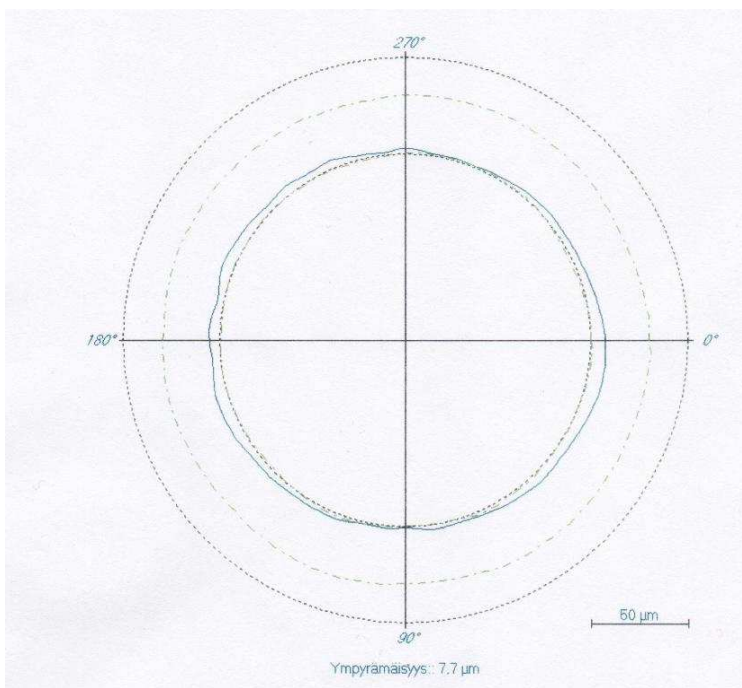
PPK7:n vastatelojen dynaamisen taipuman keskiarvo ratanopeudella 1800 m/min. Pystyakselilla lukemat ovat mikrometrejä (μm) ja vaaka-akselilla vastatelan numero. Mittaus on suoritettu vastatelan keskikohdasta.



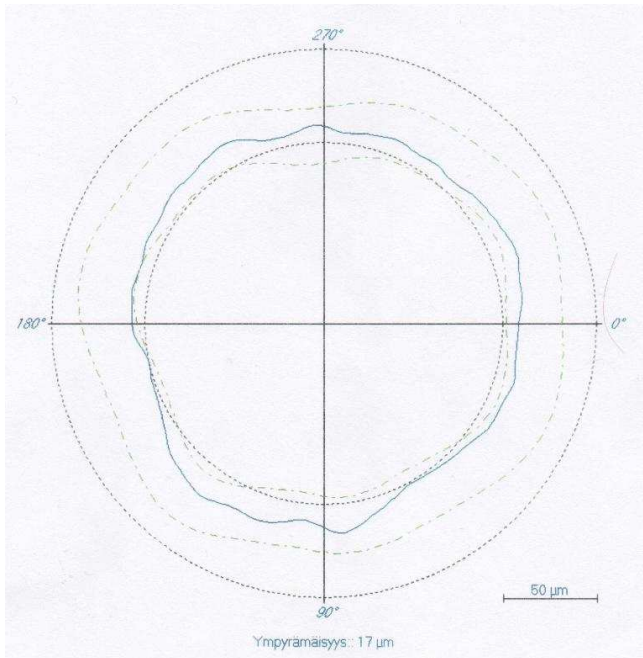
PPK6 vastatelan 1743 ympyrämaisyyden hoitopäästä hionnan jälkeen. Maksimiero 20 µm.



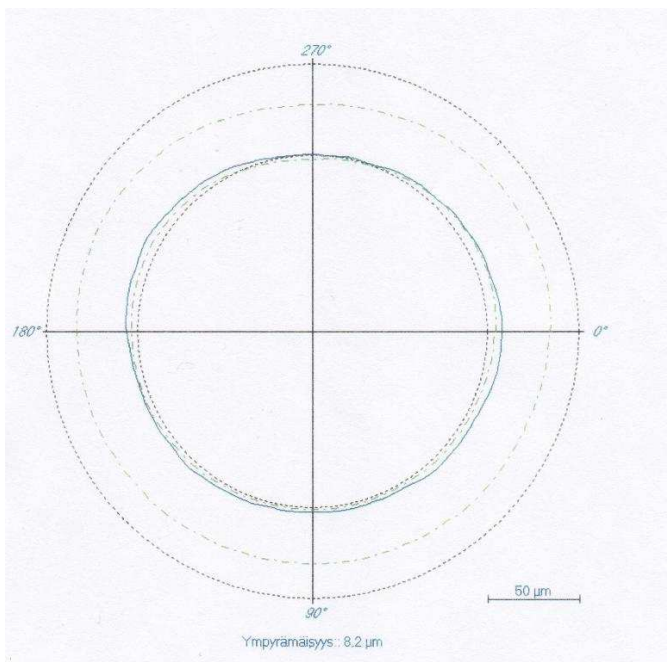
PPK7 vastatelan 2760602 ympyrämaisyyden hoitopäästä hionnan jälkeen. Maksimiero 7.7 µm.



PPK6 vastatelan 1743 ympyrämaisyyden keskeistä hionnan jälkeen. Maksimiero 17 µm.

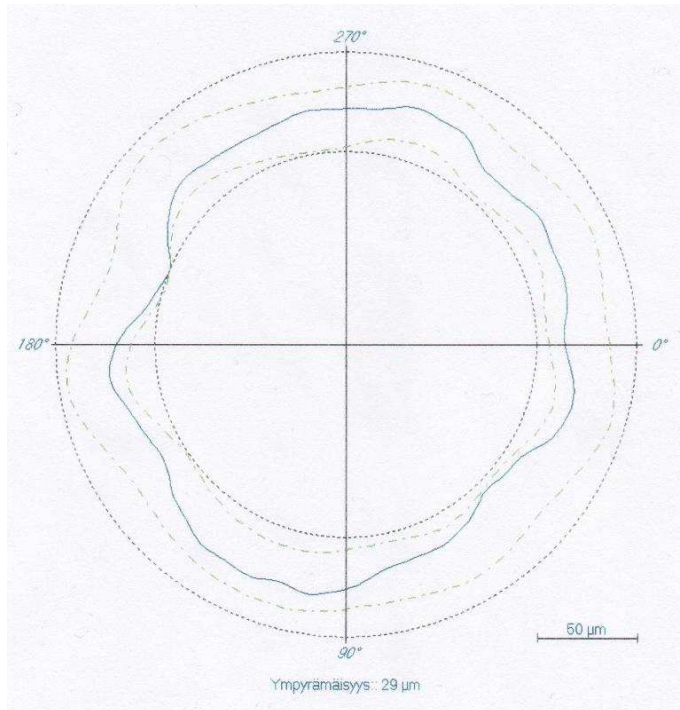


PPK7 vastatelan 2760602 ympyrämaisyyden keskeistä hionnan jälkeen. Maksimiero 8,2 µm

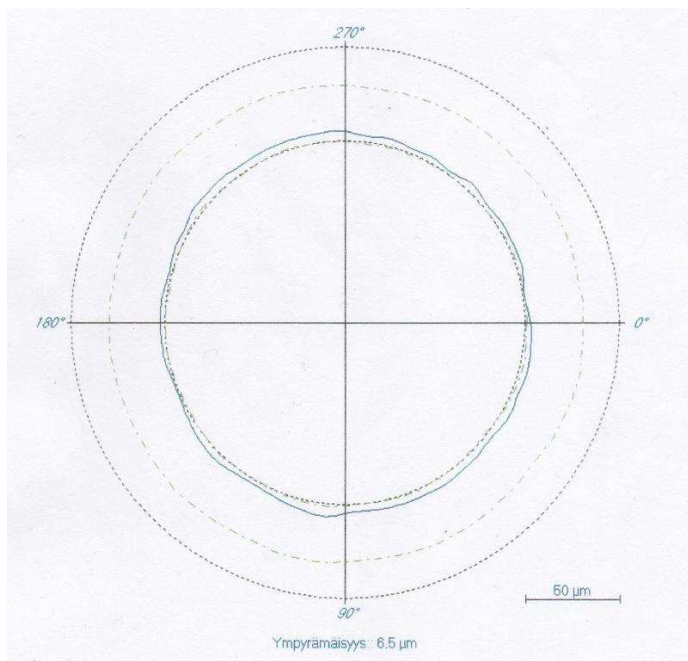


LIITE 7.

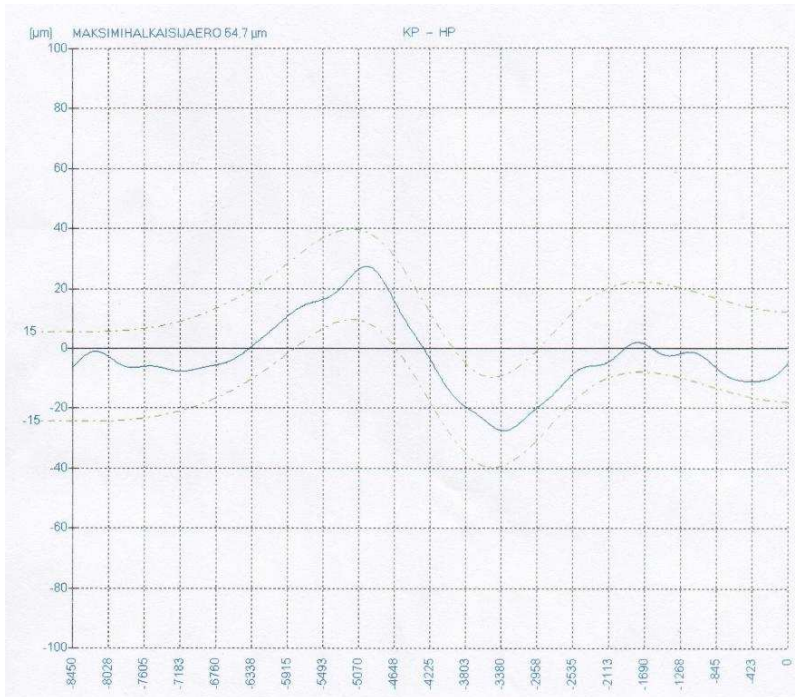
PPK6 vastatelan 1743 ympyräisyys käyttöpäästä hionnan jälkeen. Maksimiero 29 μm .



PPK7 vastatelan 2760602 ympyräisyys käyttöpäästä hionnan jälkeen. Maksimiero 6,5 μm .



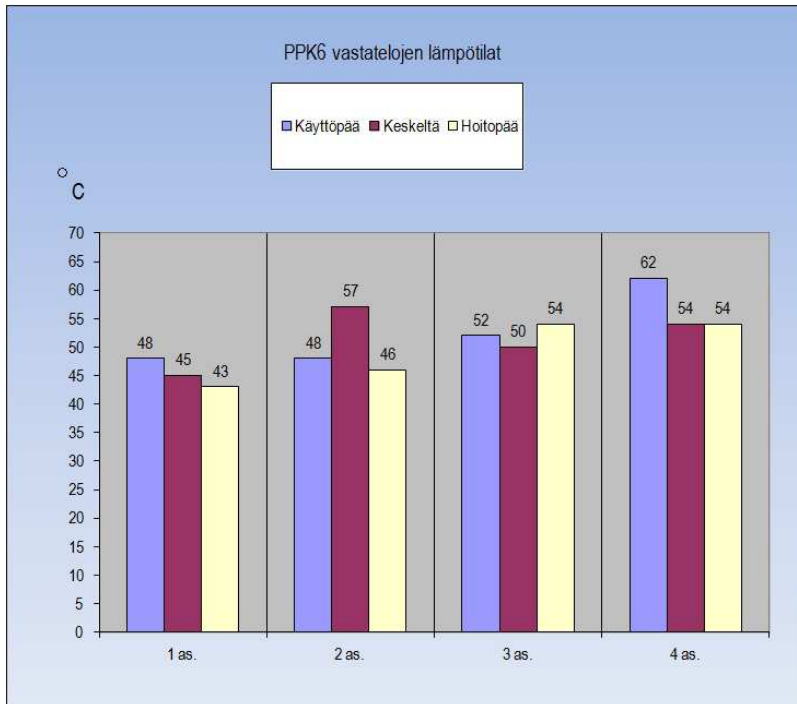
PPK6 vastatelan 1743 halkaisijaero hionnan jälkeen. Maksimiero 54,7 µm.



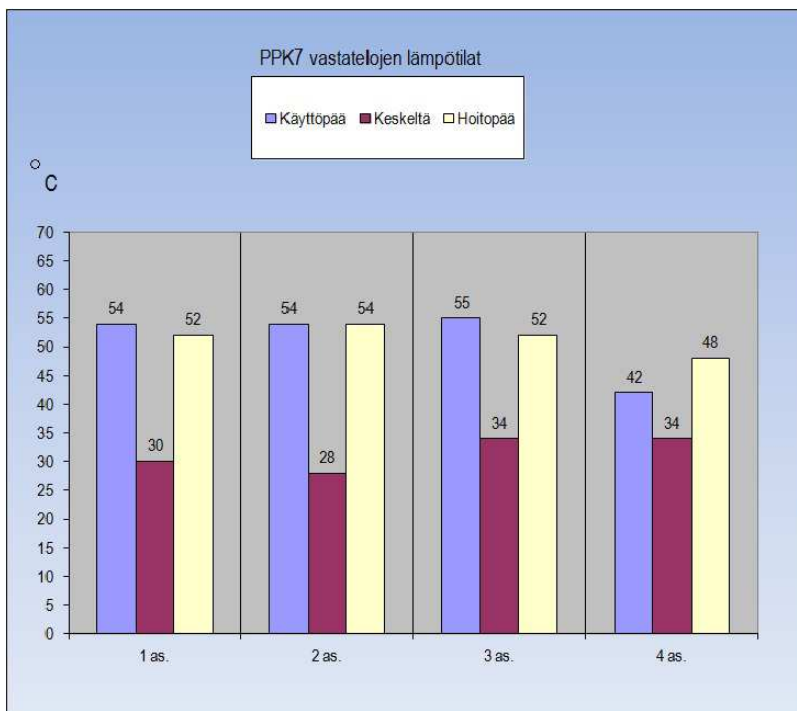
PPK7 vastatelan 2760602 halkaisijaero hionnan jälkeen. Maksimiero 24,0 µm.



PPK6:n vastatelojen lämpötilat eri päällystysasemilla.

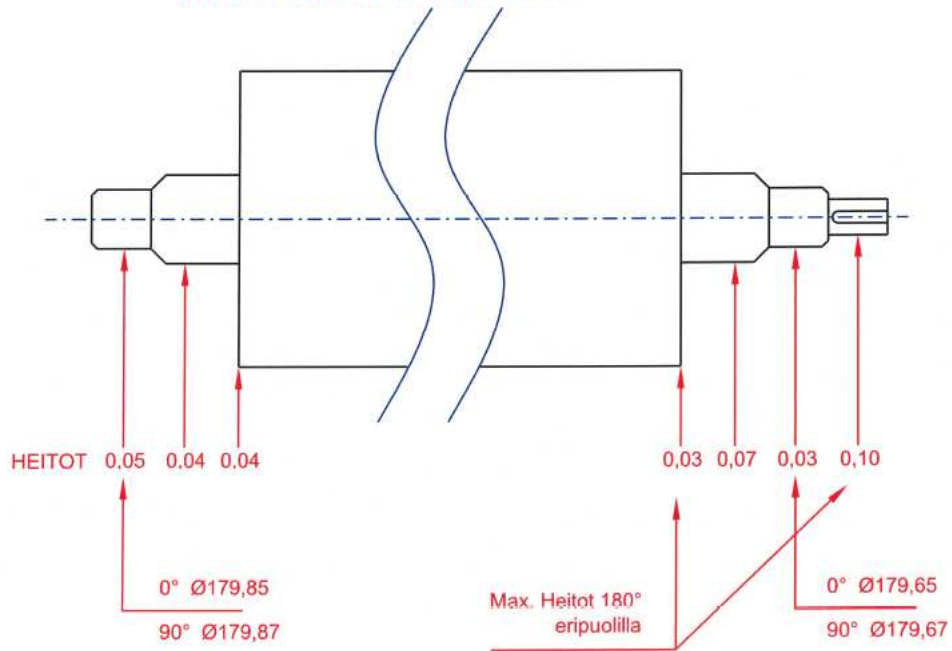


PPK7:n vastatelojen lämpötilat eri päällystysasemilla.



Pikoteknik Oy:n mittauspöytäkirja vastatelasta 1743.

Alkumittaukset



Loppumittaukset

