



Höyrylaatikon loppumitointustarkastelu laserkeilaamisen avulla

Valtteri Furuholm

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2024

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys

FURUHOLM, VALTTERI:

Höyrylaatikon loppumitointustarkastelu laserkeilaamisen avulla

Opinnäytetyö 64 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Huhtikuu 2024

Kehittämistutkimuksellisen opinnäytetyön aiheena on laserkeilauksen soveltuvuus höyrylaatikoiden loppumitointustarkasteluun. Opinnäytetyössä tutkittiin myös höyrylaatikon runkorakenteellisia muodonmuutoksia ja niiden aiheuttajia hyödyntämällä laserkeilauksella tuotettua pistepilvidataa. Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Valmet Automation Oy.

Tutkimuksen päätavoitteena oli tutkia laserkeilaamisen soveltuvuus höyrylaatikoiden loppumitointustarkasteluun. Tieto soveltuvuudesta mahdollistaa tarkemman mittaustyön suorittamisen tulevaisuudessa. Mittaustyön tekeminen kolmessa eri höyrylaatikon valmistusvaiheessa mahdollisti myös höyrylaatikon runko-osuudelle rakenteellisen tarkastelun. Tutkimusmenetelminä käytettiin havainnointia, kirjallisuuskatsausta ja simulaatiota. Aineistona hyödynnettiin aihealueen kirjallisuutta, mittauslaittevalmistajien opetusmateriaalia, standardeja ja toimeksiantajan sisäisiä dokumentteja.

Työn tuloksena saatiin vahvistettua laserkeilaamisen soveltuvuus loppumitointustarkasteluksi. Myös sen haasteet tuotiin esille tarkasti dokumentoiden. Laserkeilauksella tuotettu pistepilvidata höyrylaatikon eri valmistusvaiheista auttoi havainnollistamaan hitsauksesta aiheutuvia muodonmuutoksia ja lämmöllä suoristamista.

Opinnäytetyö toimii suunnannäyttäjänä Valmet IQ -sarjan höyrylaatikoiden valmistusteknisestä ja laadullisesta kehittämisestä. Työssä tehdyt havainnot antava vastauksia mitointustarkasteluun liittyviin ongelmiin ja avaavat samalla uusia kysymyksiä, joita tulevaisuudessa kannattaisi selvittää paremman laadun saavuttamiseksi.

Asiasanat: laserkeilaus, pistepilvi, hitsausjännitys, suoruus, muotoverailu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development

FURUHOLM, VALTTERI:
Final Dimensional Inspection of the Steam Box Using Laser Scanning

Bachelor's thesis 64 pages, appendices 3 pages
April 2024

This developmental research thesis was commissioned by Valmet Automation Oy to investigate possibilities of using laser scanning for the final dimensional inspection of the steam box. The thesis also examined the structural deformations of the steam box frame and their causes by utilizing point cloud data produced by laser scanning.

The main goal of the research was to investigate the suitability of laser scanning for the final dimension inspection of steam boxes, enabling more precise measurement work in the future. In the development research, structural deformations of the steam box were also investigated using point clouds.

The research methods included simulation, literature review and observations. The data used were literature of the subject area, teaching material of measuring device manufacturers, standards and the client's internal documents.

The research serves as a guide for the product development of the Valmet IQ series steam boxes, from a manufacturing and quality perspective. The observations made in the work help in addressing issues related to dimensional inspection. The research also raised new questions that should be investigated in the future to achieve better manufacturing quality.

Key words: laser scanning, point cloud, welding stress, straightness, form comparison

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tausta ja tavoite	8
1.2	Tutkimuskysymykset ja työn rajaus	8
1.3	Työn rakenne ja tutkimusmenetelmät	9
1.4	Työn toimeksiantaja	10
2	HÖYRYLAATIKKO.....	11
2.1	Paperikoneiden perustyytit	11
2.2	Paperin valmistamisen prosessi.....	12
2.3	Höyrylaatikko.....	17
2.3.1	Käyttötarkoitus.....	18
2.3.2	Rakenne	18
2.3.3	Painelaitedirektiivi.....	19
2.3.4	Asennus paperikoneeseen	21
3	LASERKEILAUS JA PISTEPILVI.....	23
3.1	Laserkeilaus	23
3.2	Pistepilvi	24
3.3	Mittalaitteet.....	25
3.4	Mittaustarkkuus, toistuvuus ja paikkansapitävyys	27
3.5	Mittausvirheen osatekijät.....	27
4	RAKENTEEN LUJUUS JA SUORUUS	30
4.1	Lujuustekniset ominaisuudet.....	30
4.2	Hitsausjännitykset	32
4.3	Hitsauksien oikominen	38
5	LOPPUMITOITUSTARKASTELU	40
5.1	Luotilankamittaus	40
5.2	Mittaustyön suunnittelu	41
5.3	Mittauslaitteisto	42
5.4	Mittaustyön toteutus.....	42
5.5	Muotovertailut.....	44
5.5.1	Muotovertailun ensimmäinen osuus	46
5.5.2	Muotovertailun toinen osuus.....	48
5.5.3	Muotovertailun kolmas osuus	49
5.6	Tulokset	50
5.6.1	Ensimmäisen muotovertailun tulokset	51
5.6.2	Toisen muotovertailun tulokset.....	51
5.6.3	Kolmannen muotovertailun tulokset.....	52

5.7 Tuloksien suoruus ja tasomaisuus	52
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	55
6.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen	55
6.2 Työn luotettavuus.....	56
6.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet	57
7 LÄHTEET.....	59
8 LIITTEET	62

LYHENTEET JA TERMIT

MG	engl. Machine Glazed eli konekiilloitus
Raina	paperirata
Nippi	paperikoneen telapuristimien puristus
Tampuuri	konerulla
MD	engl. Machine Direction eli paperikoneen pituussuunta
CD	engl. Cross Direction eli paperikoneen poikittaissuunta
Kalanteri	paperikoneen linjan osa, jossa muokataan paperin pak-suutta, karheutta tai kiiltoa
Layout	koneen ympäristö ja sen osat suunnittelussa
FEM	engl. Finite Element Method, numeerinen differentiaa-liyhtälöiden ratkaisumenetelmä
Solidworks	tietokoneavusteinen 3D-suunnitteluohjelma
VXelements	laserkeilaus ja mitoitustarkasteluohjelma
CAD	engl. Computer-aided Designing eli tietokoneavustei-nen suunnittelu
STEP	engl. Standard for the Exchange of Product Data, teks-titiedostotyyppi, joka mahdollistaa eri suunnittelusovel-lusten käyttää samaa tiedostoa
m	kappaleen massa
g	putoamiskiihtyvyyys
W_{z1}	taivutusvastus
I_z	akσιαalinen neliömomentti
h_1	pintakeskiön etäisyys poikkileikkauksen alareunasta
σ_m	myötöraja
E	kimmomoduuli
α	lämpölaajenemiskerroin
T	lämpötila
R	ympyrän säde
U	kaarijännite
I	hitsausvirta

v	hitsausnopeus
η	lämmönhyötykerroin
Z	etäisyys neutraaliakselilta hitsin pituusakselille
J	neliömomentti

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoite

Tämä opinnäytetyö on tehty Valmet Automationin toimeksiantona tutkia laserkeilaamisen toimivuutta höyrylaatikoiden loppumitointustarkastelussa ja selvittää sen tuoma lisäarvo suunnittelun sekä valmistamisen näkökulmasta.

Tutkimuksessa suoritettavassa mittaustyössä tutkitaan höyrylaatikon rungon pintojen suoruudet sen kolmessa eri valmistusvaiheessa. Kolme erillistä mittausta luovat mahdollisuuden tutkia rakenteellisia muodonmuutoksia ja etsiä ratkaisuja niiden pienentämiseksi tulevaisuudessa.

1.2 Tutkimuskysymykset ja työn rajaus

Kehittämistutkimus vastaa pääkysymykseen, jossa pohditaan laserkeilaamisen soveltuvuutta höyrylaatikoiden mitoitustarkastamiseen ja alakysymykseen, jossa tutkitaan valmistus- ja rakenneteknillisiä syitä vääntymien ja epäsuoruuksien muodostumiselle. Nämä kysymykset muodostivat kehittämistutkimuksen tutkimuskysymykset:

1. Soveltuuko laserkeilaaminen loppumitointustarkasteluun?
2. Miten rakenteelliset muodonmuutokset aiheutuvat ja miten niihin voidaan vaikuttaa?

Ensimmäinen kysymys toimii kehittämistutkimuksen pääkysymyksenä, johon voidaan vastata käytännössä toteutetun laserkeilaamisen jälkeen. Laserkeilaaminen onnistuessaan mahdollistaa toiseen tutkimuskysymykseen vastaamisen.

Pääkysymyksen osalta tutkimuksessa käsitellään kaikkia Valmet Automationin höyrylaatikkoversioita, sillä kaikki höyrylaatikot ovat rakenteeltaan hyvin samantapaisia laserkeilaamisen näkökulmasta. Käytännössä suoritettu työ rajataan kuitenkin yhteen höyrylaatikkoversioon, sillä opinnäytetyön mittaustyön ajankohtana muita höyrylaatikkoversioita ei ollut valmistuksessa kokoonpanovaiheessa, jossa

niihin olisi voitu suorittaa sama mittaustarkastelu. Samalla tällä rajauksella saadaan kohdistettua tutkimustyö yhteen versioon ja näin mahdollistetaan laaja-alainen tarkastelu.

Alakysymykseen liittyvän rakenteellisen tarkastelun pohjana toimivat laserkeilaamisesta saadut mittaustulokset, joten kehittämistutkimus rajautuu myös sen osalta yhteen höyrylaatikkomalliin. Kehittämistutkimus tarjoaa kuitenkin vastauksia rakenteellisiin kysymyksiin, joita voidaan soveltaa myös muihin höyrylaatikkomalleihin huomioiden profiilien muotoerot.

1.3 Työn rakenne ja tutkimusmenetelmät

Tämä opinnäytetyö on kehittämistutkimus, joka mukailee kvalitatiivista tutkimusotetta, jossa pyritään ymmärtämään tutkimuskohteena olevaa ilmiötä, sen rakennetta, tekijöitä ja niiden välisiä kausaalisuhteita (Kananen 2012, 29). Kehittämistutkimuksessa käytetyt tutkimusmenetelmät ovat havainnointi, kirjallisuuskatsaus ja simulaatio. Tutkimusmenetelmien avulla käydään läpi tutkimuskysymyksiä ja pyritään löytämään niihin vastauksia hyödyntämällä teoriaa ja havaintoja.

Rakenteeltaan opinnäytetyö jakautuu viiteen lukuun. Ensimmäisessä luvussa lukijalle luodaan pohja ymmärtää höyrylaatikoiden toimintaympäristöä eli paperikoneita. Luvussa käydään läpi tutkimuskohteena olevan höyrylaatikon toimintaperiaate, sen rakenne ja toimintaympäristöön sijoittamiseen liittyvät asiat. Tarkoituksena on mahdollistaa tutkimuksen kokonaisvaltainen ymmärtäminen.

Toisessa luvussa käsitellään päätutkimuskysymykseen liittyvä teoria. Luvussa esitetään laserkeilaamiseen ja mittaukseen liittyvät osatekijät, muuttujat ja virheet. Tämän ohella käsitellään mittalaitteiden ja mittaamisen teoriaa myös vanhan luotilankamittauksen näkökulmasta, jotta tutkimukselle muodostetaan luotettava pohja kahden eri mittausmenetelmän vertaamiseksi.

Kolmannessa luvussa käydään läpi alatutkimuskysymykseen liittyvä teoria. Luvussa pohdintaan rakenteen lujuusteknisiä ominaisuuksia ja esitetään valmistus-

tavan mahdollinen vaikutus muodonmuutoksiin. Luvussa esitetään myös lujuustekninen simulointi höyrylaatikolle, jota käytetään vertauskohtana muotovertailuissa ilmenneille havainnoille työn pohdintaosuudessa.

Neljännessä luvussa käydään läpi käytännön työn osuus, tuodaan esille työstä saadut tulokset ja luodaan pohja pohdintaa varten. Tämä osuus on tärkeässä roolissa tutkimustuloksien havainnoimiseksi. Sisältö luo mahdollisuuden teoriaosuuksissa käytyjen asioiden vertaamisen käytännön työssä tehtyihin havaintoihin mahdollistaen kehittämistutkimuksen onnistuneisuuden. Luvussa käydyt muotovertailut ovat kuvitettu helpottaakseen käytännön työn toteutuksen ymmärtämisen.

Viidettä lukua voidaan pitää kehittämistutkimuksen tärkeimpänä, sillä siinä vastataan pää- ja alakysymyksen, pohditaan työn onnistuneisuutta ja luotettavuutta. Luvussa pohditaan tutkimuksessa tehtyjä havaintoja höyrylaatikon rakenteelliselta näkökannalta ja tarjotaan vastauksia tulevaisuutta ajatellen. Osiossa käydään läpi laserkeilauksen jatkumahdollisuudet loppumitointitarkasteluna.

1.4 Työn toimeksiantaja

Kehittämistutkimuksen toimeksiantajana toimii Valmet Automation Oy, joka on suomalaisen suuryritys Valmet Oyj:n tytäryhtiö. Valmet Automation keskittyy toimittamaan kestäviä automaatoratkaisuja kartonki-, sellu-, paperi-, pehmopaperi ja energiateollisuuden tarpeisiin. Valmet Automation toimittaa tuotteita ja järjestelmiä myös meriteollisuuteen. Valmet on vakiintunut markkinajohtaja vankalla markkina-asemalla sen kaikissa liiketoimissaan. Vuonna 2023 Valmetin liikevaihto oli 5,5 miljardia euroa ja se työllisti yli 19 000 henkilöä. (Valmet 2023a.)

2 HÖYRYLAATIKKO

2.1 Paperikoneiden perustyytit

Tutkimus käsittelee höyrylaatikkoa ja sen mitoitustarkastelua, mutta työssä on hyvä avata paperin valmistamisen prosessia, sen laitteita ja niiden toimintoja, jotta lukija ymmärtää höyrylaatikon toimintaa ja syitä sen rakenteellisiin ominaisuuksiin. Luvussa 2.2 käydään läpi yleisellä tasolla paperikoneen toiminta, mutta on hyvä tiedostaa, että paperikoneissa on eroavaisuuksia. Paperikoneiden laitekokonaisuudet ja niiden määrät voivat vaihdella laajasti riippuen valmistettavasta paperista. Kaikki paperikoneet kuitenkin sisältävät seuraavat osat:

- märkää, jossa paperiraina muodostetaan. Märkäässä massasta poistetaan vettä virojen avulla ja saavutetaan noin 20 % kuiva-ainepitoisuus
- puristinosaa, jossa paperirainasta poistetaan vettä puristamalla. Puristinosalla raina saavuttaa 35–45 % kuiva-ainepitoisuuden.
- kuivatusosa, jossa paperirainan kuivattamista jatketaan haihduttamalla. Tämä merkitsee noin 90–95 % kuiva-ainepitoisuutta (Paperikoneet yleistä 1997, 13).

Paperikoneiden perustyytit voidaan jakaa seuraavasti seitsemään eri tyyppiin:

1. Tasoviirakone

Tasoviirakoneet voivat olla joko monisyylinterisellä kuivatusosalla tai yhdellä suurella MG- tai jenkki-syylinterillä varustettuja paperikoneita. MG-syylinterillä saavutetaan kiiltävä pinta paperin tai kartongin toiselle puolelle. (Paperikoneet yleistä 1997, 13.)

2. Hybridiformeri

Hybridiformeri on konetyyppi, jonka viiraosa sisältää tasoviiran ja sen yläpuolella sijaitsevan ylaviiran. Hybridiformerin viiraratkaisu parantaa paperirainan muodostamista, sen sileyttä ja vedenpoistamista. (KnowPap n.d.a).

3. Yhdistelmäkoneet

Yhdistelmäkoneet ovat jenkki sylinterisiä tasoviirakoneita, joissa vedenpoistoa on tehostettu pienisylinterisillä esi- tai jälkikuivatusosilla.

4. Lieriöviirakoneet

Lieriöviirakoneissa rainanmuodostus tapahtuu lieriön muotoisilla viiroilla, jossa viirapäälysteiset sylinterit pyörivät massaseosaltaassa. Lieriöviirat on varusteltu imulla, joka tehostaa vedenpoistoa ja rainan muodostamista. (Paperikoneet yleistä 1997, 13.)

5. Pehmopaperikoneet

Pehmopaperikoneet ovat hyvin nopean ratanopeuden omaavia paperikoneita. Moderneista pehmopaperikoneista käytetään termiä tissuekone, joiden toimintaperiaate perustuu kaksoisviiraan saavuttaakseen nopean, hallitun ja suurella nopeudella tapahtuvan veden poistamisen. Tissuekoneissa kuivatus suoritetaan jenkki sylinterillä, jossa paperi kaavitaan sylinteriltä. Tällä saavutetaan paperin viristymisen eli kreppautumisen. (Paperikoneet yleistä 1997, 16.)

6. Kartonkikoneet

Kartonkikoneet valmistavat kartonkia joko yhdellä tasoviiralla, vedenpoistoyläviirayksiköllä tai liittämällä yhteen kahdesta kuuteen paperirainaa. (Paperikoneet yleistä 1997, 16.)

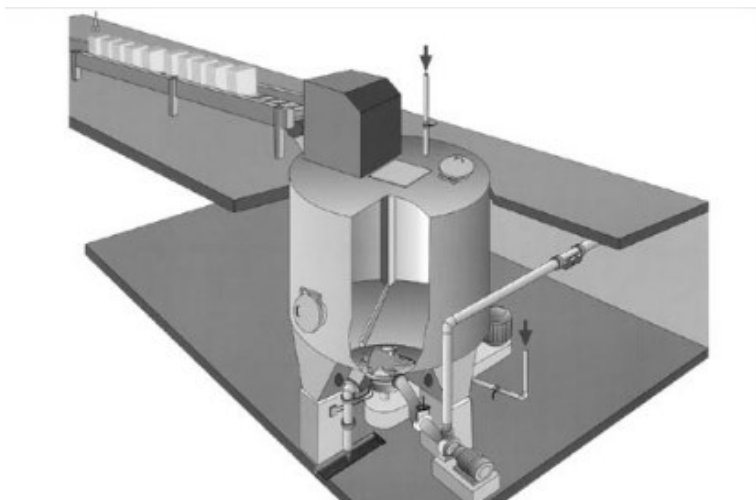
7. Kitaformerit, eli kaksoisviirakone

Kitaformerit koostuvat kahdesta päättymättömästä viirasta, joiden väliin perälaatikko suihkuttaa massaseosta. Kitaformerissa alkuvedenpoisto toteutetaan tasaisella vedenpoistopaineella toimivalla formeritelalla. (Know-Pap n.d.a).

2.2 Paperin valmistamisen prosessi

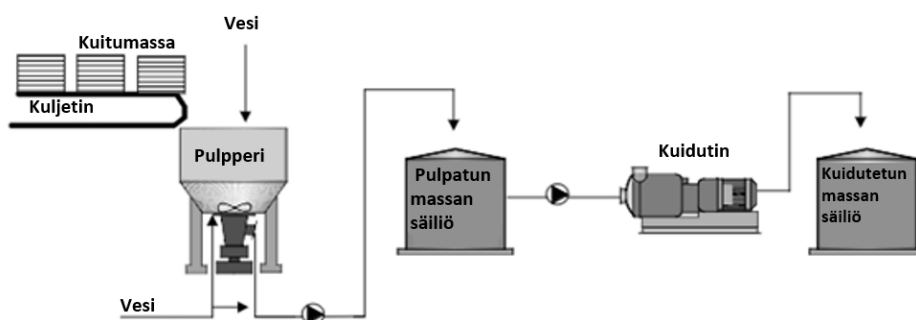
Paperin valmistus on monivaiheinen prosessi, joka lähtee käyntiin kuitumassan käsittelystä prosessiin sopivaksi. Kuitumassa koostuu kuiva-aineksesta ja vedestä, jotka sekoitetaan keskenään pulppereissa. Pulpperit ovat suuria säiliöitä

(kuva 1), joiden pohjalla pyörivä roottori rikkoo massakokkareet ja sekoittaa veden sekä kuiva-aineksen keskenään. Pulpperissa massan kuiva-ainepitoisuus on noin 4–5 %. (Paulapuro 2007, 82.)



KUVA 1. Pystysuuntainen pulperi (Paulapuro 2007, 80).

Pulperin jälkeen massaseos ohjataan yleensä kuiduttimeen, jossa varmistetaan seoksen tasainen sekoittuminen pyörivien roottorien ja paikallaan pysyvien staattorien avulla. Kuiduttimessa pumpattavaa massa-ainesta käsitellään edelleen niin, että sen sisältävät kuivat ja jäykät kuituniput hajotetaan yksittäisiksi kosteiksi ja joustaviksi kuiduiksi. Kuiduttimessa tapahtuvaa massa-aineksen käsittelyä kutsutaan defibraatioksi, johon massaseoksen viimeistely päättyy. Kuitumassan käsittely paalimassalla on esitetty kuviossa 1. (Paulapuro 2007, 80.)



KUVIO 1. Massan käsittelyprosessi. Käännetty suomeksi. (Paulapuro 2007, 82).

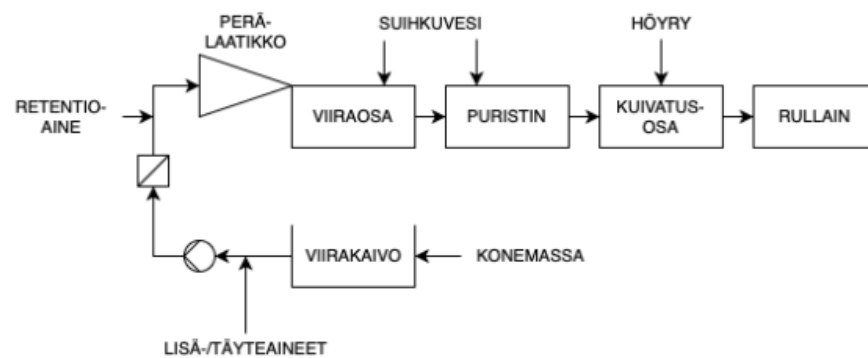
Kuitumassan käsittely voidaan toteuttaa eri tavoilla riippuen sen alkutilasta. Esimerkiksi yläpuolella esitetty käsittelyprosessi paalimassalla eroaa laitteistoltaan käsittelyyn märkämassalla. Suoraan putkesta tuleva märkämassa ei välttämättä

vaadi kuidutinta saavuttaakseen sopivan sakeuden ja kuituseos voidaan ohjata suoraan jauhatukseen. (Jokinen 2024)

Paperin valmistus konelinjassa alkaa perälaatikosta ja loppuu rullaimen. Paperikoneet sisältävät yleisesti seuraavat laitekokonaisuudet:

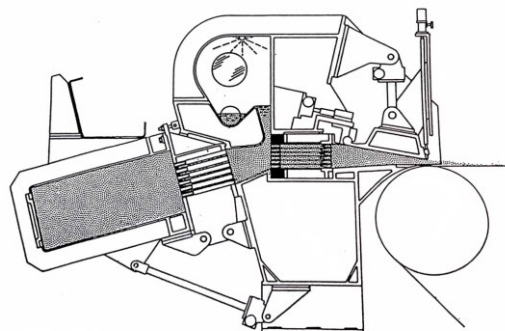
- perälaatikko
- viiraosa
- puristin
- kuivatusosa
- rullain.

Kuviossa 2 on esitelty paperinvalmistuksen prosessi sen eri laitekokonaisuudet.



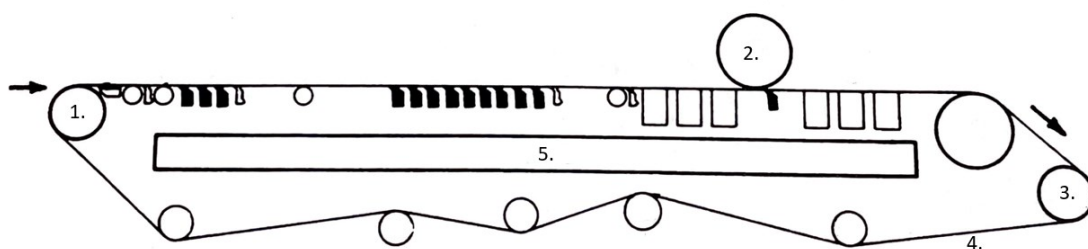
KUVIO 2. Paperikoneen eri osakokonaisuudet ja niiden virtaukset (Eko 2021, 11).

Perälaatikon toiminta perustuu massan syöttämiseen viiraosalle koko radan leveydelle. Jotta perälaatikon toiminta on optimoitua, laatikon täytyy kyetä syöttämään viiraosalle paperirainan muodostamisen edellyttämä määrä massaa. Perälaatikolla saadaan aikaan turbulenssi massasuspensioon kuitupaakkujen hajottamiseksi. Kuviossa 3 esitetty hydraulitoiminen perälaatikko. (KnowPap n.d.b.)



KUVIO 3. Tampellan hydraulitoiminen perälaatikko (Paperikoneet yleistä 1997, 18).

Viiraosalla massasta poistetaan osa sen sisältämästä vedestä. Veden poisto tapahtuu viiraosan rintatelan ja imutelan väliin pingotetun viiran alapuolella sijaitsevilla vedenpoistoelimityillä. Viiraosa saattaa paperirainan riittävän korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen mahdollistaen rainan siirron puristimelle niin, että saavutetaan rainalle hyvä ajettavuus. Alapuolen kuviossa 4 on esitetty tasoviiratyypin ja sen pääosat. (KnowPap n.d.b.)

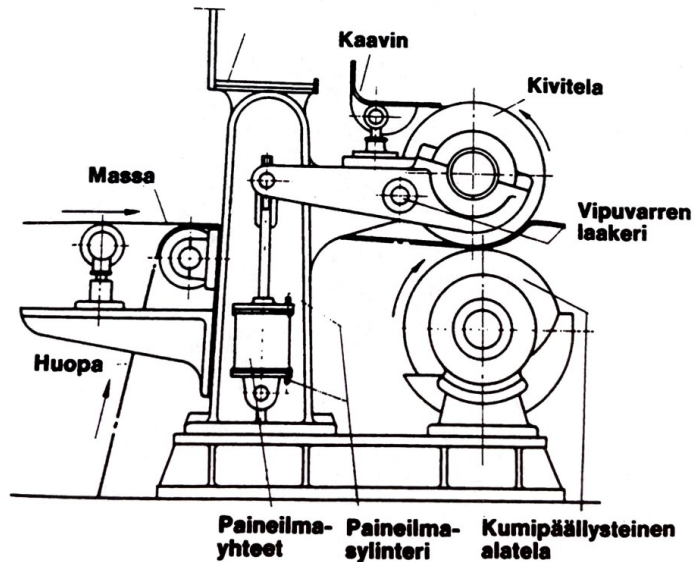


KUVIO 4. Tasoviira laitteineen (Paperikoneet yleistä 1997, 49).

Kuviossa 4 esitelty tasoviiran pääosat, jotka ovat:

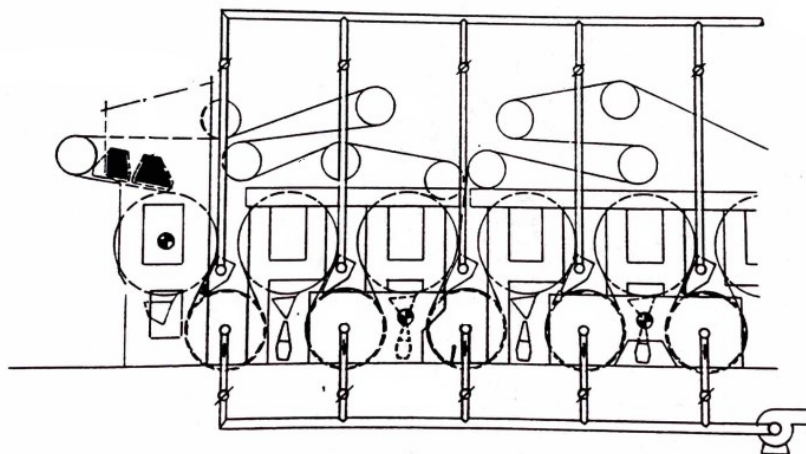
1. rintatela
2. viirarulla
3. vetotela
4. viira
5. viiravesiallas.

Puristinosalla paperiraina tiivistetään samalla poistaen mahdollisimman paljon vettä. Paperiraina poistuu viiraosalta noin 20 % kuiva-ainepitoisuudella, jonka jälkeen se puristetaan puristimella noin 35–45 % kuiva-ainepitoisuuteen. Puristimet muodostuvat yleisesti kahdesta tai kolmesta telasta, joiden läpi paperiraina kulkee. Teloja puristetaan toisiaan vasten aiheuttaen veden poistumisen rainasta. Puristimen telat voivat olla tasaisia, rei'itettyjä tai uritettuja. Kuviossa 5 on esitetty paineilmasäätöinen puristin ja sen osat. (Paperikoneet yleistä 1997, 82.)



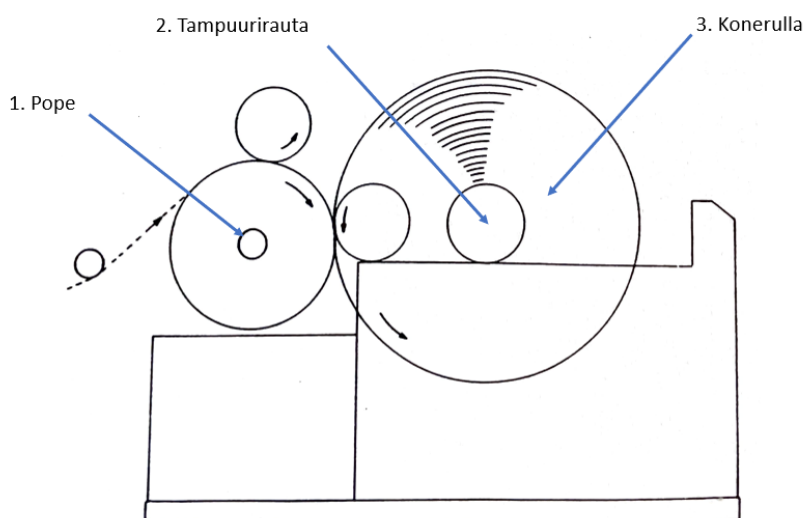
KUVIO 5. Paineilmasäätöinen puristin (Paperikoneet yleistä 1997, 83).

Puristimen jälkeen paperiraina kulkee kuivatusosalle, jossa vettä poistetaan haihuttamalla. Haihdutus voidaan toteuttaa kontakti- eli sylinterikuivatuksella (kuvio 6), puhalluskuivatuksella tai säteilykuivatuksella. Sylinterikuivatuksessa lämpö ohjataan kontaktin avulla paperirainaan mahdollistaen vapaa veden höyrystymisen ja haihtuminen. Puhalluskuivatuksessa paperiraina kulkee puhallinlaatikon vierestä, jossa sijaitsevat suuttimet ohjaavat kuuman ilmavirtauksen paperirainaan. Säteilyskuivatuksessa paperirainaan kohdistetaan infrapunasäteilyä, jolla saadaan aikaan rainan kuivuminen. (KnowPap n.d.b.; Paulapuro 2009, 27).



KUVIO 6. Valmet VAC-Roll kuivatussylinteriryhmä (Paperikoneet yleistä 1997, 119).

Paperikoneen viimeinen vaihe on rullain, jossa paperi pyöritetään tampuuriraudan ympärille muodostaen konerullan. Rullaimen muodostaa suuri vesijäähdytteinen sylinteri, jota kutsutaan popeksi (kuvio 7). Rullaimen muodostama konerulla on koko paperikoneen radan levyinen. Leveä rulla leikataan myöhemmin kapeammiksi rulliksi pituusleikkurilla. Virheellisesti pituusleikkauksessa rullautuneet paperirullat voidaan rullata uudelleen asiakasrulliksi uudelleenrullaimessa. (Paperikoneet yleistä 1997, 154.)



KUVIO 7. Pope-rullain (Paperikoneet yleistä 1997, 154).

2.3 Höyrylaatikko

Tässä luvussa käydään läpi höyrylaatikon käyttötarkoitus, sen toimintaperiaate ja rakenne. Luvussa esitetään myös tuotetta koskeva painelaitedirektiivi, jota valmistajan on lain velvoittamana noudatettava.

Koska työssä tutkitaan Valmet Automationin omaa tuotetta, höyrylaatikon rakennetta ei voida täysin avata. Höyrylaatikon rakenne käydään suppeasti läpi, jotta vältetään tuotesalaisuuksien luovuttamiselta julkiseen tietoisuuteen. Rakenteesta (kuvio 8) esitetään höyrylaatikon tärkeimmät osat sen toiminnan kannalta ja ne ulkoiset osat, joita käsitellään kehittämistutkimuksen tulokset ja pohdintaosuudessa.

2.3.1 Käyttötarkoitus

Höyrylaatikot (kuva 2) ovat paperikoneissa käytettyjä prosessilaitteita, joiden avulla parannetaan veden poistumista rainasta ennen kuivatusosaa laskien kuivatuskustannuksia. Höyrylaatikko kasvattaa rainan lämpötilaa ja samalla laskee sen sisältämän veden viskositeettia ja pintajännitystä. Höyryruiskutusjärjestelmä syöttää höyryä optimaalisella nopeudella rainan pinnan yli, mikä tiivistyy paperiverkon sisällä edistämällä maksimaalista lämmönsiirtoa. Höyrylaatikoita käytetään myös paperikoneiden loppuosuuksissa paperin ominaisuuksien muokkaamiseen. Näitä ovat esimerkiksi sileys, kiiltoaste ja CD-suuntainen profilointi. (Paulapuro 2007, 310; Paulapuro 2009, 70.)



KUVA 2. Valmet IQ höyrylaatikko. (Valmet 2022)

2.3.2 Rakenne

Höyrylaatikot ovat rakenteeltaan nimensä veroisesti laatikkomaisia ohutlevyrakenteita, jotka valmistetaan haponkestävästä teräksestä. Höyrylaatikoiden laatikko-osuuden pituudet vaihtelevat kolmesta kahteentoista metriin riippuen paperikoneen rataleveyydestä, jonne laatikko asennetaan. Höyrylaatikon kokonaispituutta kasvattavat lisäksi sen molemmissa päissä sijaitsevat kannakeputket, joiden avulla laatikko asennetaan paperikonelinjaan.

Laatikon runko valmistetaan paksusta haponkestävästä teräksestä, joka taivutetaan sille suunniteltuun muotoon. Runkoon hitsataan pituussuunnassa yläpuo-

lolla oleva teräslevy, jonka avulla muodostetaan kotelomainen rakenne. Hitsaus-
saumat ovat koko laatikko-osuuden pituiset, jolla varmistetaan runko-osuuden il-
matiiveys ja samalla sen paineenkestävyys.

Höyrylaatikon kotelomaisen rakenteen ylä- ja alapinnassa on reiät höyrynsyöttö-
venttiiliputkia varten. Höyrynsyöttöventtiili koostuu putkesta ja venttiilipesästä,
jonka yläosa hitsataan ilmatiiviiksi laatikon runko-osan yläpintaan. Höyrynsyöttö-
venttiilit mahdollistavat höyryn syöttämisen paineistetusta höyrykotelosta ylös-
päin kohti vyöhykekammiota. Höyrynsyöttöventtiilin alapäässä on kiinni toimilaitte,
jolla säädetään höyrynsyöttöventtiiliä. Toimilaitteella voidaan hallita laatikon jo-
kaista venttiiliä yksittäin, joka mahdollistaa höyryn virtaamisen säätämisen ja koh-
distamisen tietylle alueelle paperirainaa.

Kun höyry virtaa paineistetusta laatikko-osuudesta höyrynsyöttöventtiilin läpi
kohti vyöhykekammiota, virtaus levitetään putken yläpuolella sijaitsevalla hajo-
tuslevyllä. Hajotuslevy on teräksestä valmistettu levy, jonka rei'itetty pinta levittää
putkesta virtaavan höyryn tasaisesti estolevyistä muodostettuun koteloon. Hajo-
tuslevyllä estetään virtauksen suora jatkuvuus kohti diffuusiolevyä. Hajotuslevyllä
levitetty höyry kohdistetaan tasaisesti paperirainaan diffuusiolevyn läpi. Diffuusio-
levyt ovat ohutta teräslevyä, joiden pinta on viistosti rei'itetty. Tällä mahdolliste-
taan höyryn virtaaminen paperirainaan sen koko leveydeltä. Diffuusiolevyjen rei-
kien lukumäärä riippuu höyrylaatikon mitoituksesta.

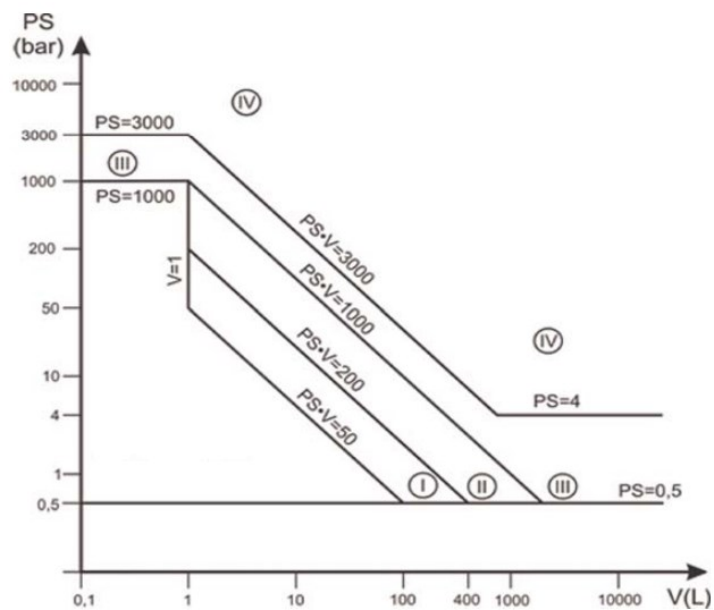
Höyrylaatikko on vuorattu eristyksellä, joka estää lämmön karkaamisen laatikon
sisältä. Eristys sijaitsee paineistetun laatikko-osuuden ympärillä sen koko pituu-
della. Eristyksellä saadaan laskettua laatikon käyttökustannuksia ja parannettua
sen toimintavarmuutta. Laatikko-osuuden eristys on vuorattu sen ulkopuolelta
vuoripelleillä, jotka hitsataan runkoon kiinni sen ylä- ja alaosasta. Vuoripeltien hit-
saukset vaativat myös laatikon pituussuuntaisia pitkiä hitsausaumoja, joiden vai-
kutusta muotovertailujen toteuttamiseen käsitellään myöhemmin luvussa 5.

2.3.3 Painelaitedirektiivi

Höyrylaatikon paineistetun laatikko-osuuden tilavuus vaihtelee 200–1000 litran välillä käyttöpaineen ollessa 0,8 bar. Näiden käyttöarvojen perusteella höyrylaatikko luokitellaan painelaitedirektiivin (myöh. PED) 4 artiklan (2014/68/EU) mukaiseksi painelaitteeksi.

PED:n 4 artikla vaatii säiliötä täyttämään tietyt turvallisuusvaatimukset, jotka ovat tarkoitettu kaasuille, nesteytetyille kaasuille, höyryille sekä nesteille, joiden höyrypaine on korkeimmassa sallitussa lämpötilassa yli 0,5 bar suurempi, mitä normaalin ilmakehän paine.

Direktiivin 4 artiklan 1 kohdan a alakohdan i alakohdan toisessa luettelmauksessa tarkoitetut painelaitteet luokitellaan kuvion 8 mukaisesti neljään eri luokkaan.



KUVIO 8. PED:n 4 artiklan 1 kohdan a alakohdan i alakohdan toisessa luettelmauksessa tarkoitetut säiliöt (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU, 70).

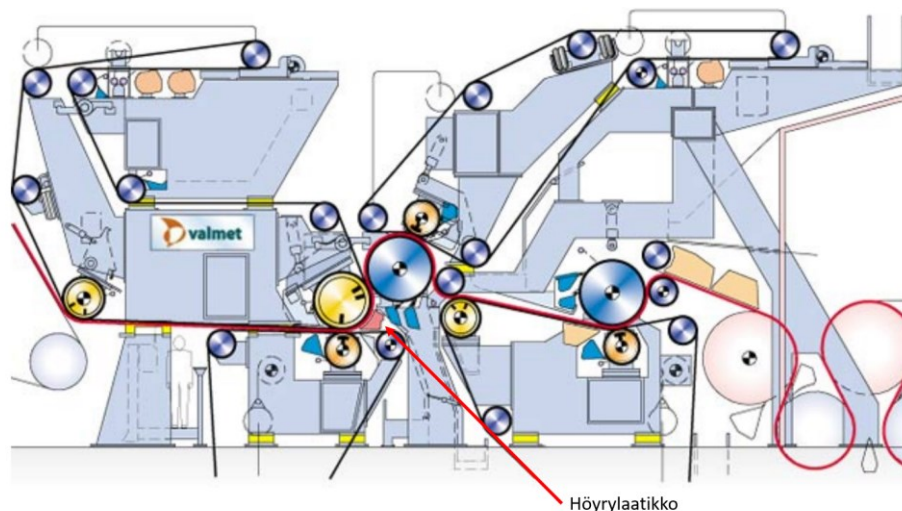
Vaatimuksenmukaisuus määräytyy painelaitteen käyttöpaineen ja sen tilavuuden tulosta. Käyttöpaineen ja tilavuuden tulo asettaessa 200–1000 baarilitran väliin, luokitellaan painelaitteet luokkaan kaksi. Höyrylaatikot kuuluvat luokitukseen, jossa noudatetaan moduulin A2 mukaista sisäistä tuotannonvalvontaa ja ulkopuolisen tahon toteuttamia valvottuja painelaitetarkastuksia satunnaisin väliajoin.

PED määrittää valmistajaa täyttämään moduulin A2 kohdissa 2–5 säädetyt velvoitteet sekä varmistaa ja vakuuttaa, että kyseinen painelaite täyttää direktiivin mukaiset vaatimukset. (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU 2014, 75.) Moduuli A2:n velvoittavat kohdat ovat:

- tekniset asiakirjat, joilla voidaan arvioida painelaitteen vaatimustenmukaisuus
- valmistus, jossa tarvittavilla toimenpiteillä taataan painelaitteen olevan teknisten asiakirjojen vaatimustenmukainen
- lopputarkastus, jota valvoo ulkopuolinen taho tekemällä ennalta ilmoittamattomia tarkastuskäyntejä valmistajan luona
- CE-merkintä, jolla todennetaan painelaitteen direktiivin sovellettavat vaatimukset. (Painelaitedirektiivi 2014/68/EU 2014, 75.)

2.3.4 Asennus paperikoneeseen

Höyrylaatikon sijoittamissijainti paperikonelinjassa riippuu siitä mitä höyrylaatikolla halutaan saavuttaa. Jos höyrylaatikon päätarkoituksena on parantaa kuivatusprosessia, sijoitetaan ne yleisimmin puristinosalle (kuvio 9). Höyrylaatikolla voidaan myös muokata paperirainan ominaisuuksia ja profiilia, jolloin sijoitus tehdään paperikoneen loppuosalla kalanterille (Rautiainen 2009, 110). Viira- tai puristinosalle sijoitetulla höyrylaatikolla voidaan myös muokata rainan CD-suuntaista profiilia. Kuivatusprosessin parantamiseen tarkoitettut höyrylaatikot asennetaan puristinosalle lähelle seuraavaa nippiä, jotta lämmön karkaaminen paperirainasta minimoitaisiin ennen puristamista. (Paulapuro 2007, 310)



KUVIO 9. Höyrylaatikko asennettuna puristimella lähelle seuraavaa nippiä (KnowPap n.d.c).

Höyrylaatikot asennetaan paperikoneessa noin 12–20 millimetrin etäisyydelle paperirainasta tai telasta. Tämä asettaa vaatimuksen höyrylaatikon tarkalle suorudelle. Höyrylaatikkoa ajetaan huolto- ja käyttöasennon välillä sen päädyissä sijaitsevilla liikutuslaitteilla.

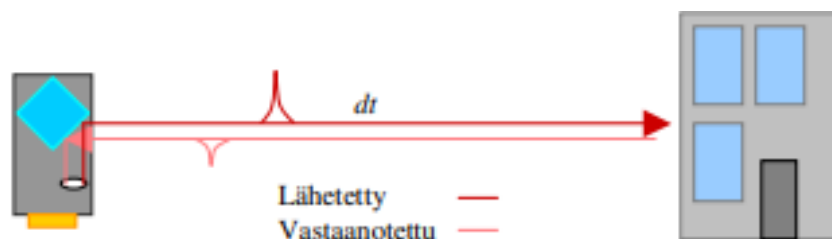
3 LASERKEILAUS JA PISTEPILVI

3.1 Laserkeilaus

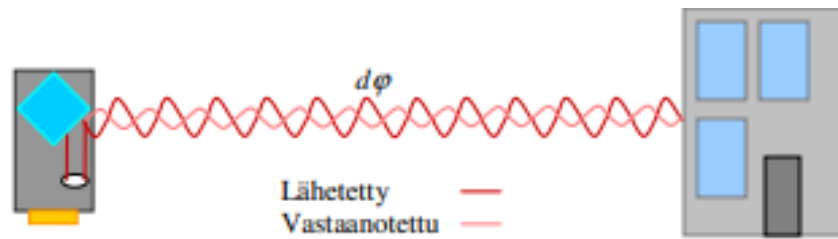
Laserkeilain on mittalaite, jonka avulla voidaan määrittää kolmiulotteisia pintoja keilattavasta ympäristöstä tai yksittäisestä kappaleesta. Laserkeilaimen toimintaperiaate perustuu laserpulssiin, jossa keilain laskee signaalin lähetyksen ja vastaanoton matka-ajan tai vaihe-eron. Matka-ajan ja laserpulssin lähtökulmien avulla keilain määrittää mitatulle pisteelle X-, Y- ja Z- koordinaatin, joka määrittää pisteen sijainnin. Nykyaikaiset laserkeilaimet mittaavat miljoonia pisteitä sekunnissa, jolloin laserkeilain muodostaa lopputuotteeksi mitattavaa ympäristöä tai kappaletta mukailevan pistepilven. (Joala 2006, 1.)

Laserkeilain mahdollistaa koskemattoman mittauksen nopeasti ja tarkasti myös geometrialtaan haastaviin kappaleisiin tai ympäristöihin. Mittaus toteutetaan etäältä, jolloin kappaleeseen ei tarvitse päästä fyysisesti käsiksi. Tämä mahdollistaa mittaukset haasteellisissa paikoissa kuten esimerkiksi paperikoneympäristössä. Kosketukseton mittaus lisää myös turvallisuutta sillä se mahdollistaa mittauksen suorittamisen ilman koneiden vaara-alueelle menemistä. Näin mittausmenetelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi käynnissä olevalle paperikoneelle.

Laserkeilaimet jaotellaan kahteen eri ryhmään pisteiden mitoitustoiminnan perusteella: pulssilasereihin ja jatkuva-aaltoisiin lasereihin. Pulssilasereilla mitoitus perustuu laserpulssin kulkuaikaan (kuvio 10) ja jatkuva-aaltoisissa (kuvio 11) taas lasersäteen vaihe-eroon. (Joala 2006, 2.)



KUVIO 10. Pulssilaserin toimintaperiaate (Kukko 2005, 7).



KUVIO 11. Jatkuva-aaltoisen laserin toimintaperiaate (Kukko 2005, 7).

Jatkuva-aaltoinen laser lähettää jatkuvaa signaalia, jonka intensiteetti on moduloitu siniaallolla tai monimuotoisemmalla aallonmuodolla. Lasersignaali heijastuu jatkuva-aaltoisella laserilla kappaleesta takaisin mittausslaitteeseen pulssilaserin tavoin, mutta jatkuva-aaltoisuus mahdollistaa jopa miljoonan mittauspisteen mittaamisen sekunnissa. Vaihe-erolaserissa mittauspisteen paikoitus toteutetaan lähetetyn ja vastaanotetun signaalin vaihe-eron ja kokonaislukutuntemattoman avulla. (Kukko 2005, 7.)

3.2 Pistepilvi

Laserkeilaus eroaa tavallisista mittausten menetelmistä sen tuottaessa lopputuotteeksi pistepilven, eikä varsinaista numeerista mittaustietoa. Pistepilvi muodostuu kolmeulotteiseen koordinaatistoon useasta eri pisteestä, jotka määritetään xyz-koordinaateilla kohdalleen. Jokaisella pisteellä on näin ollen oma paikkansa ja intensiteettinsä eli voimakkuutensa.

Pistepilven pisteet muodostavat niin sanotun verhon, joka mukailee mitatun kappaleen ulkoisia pintoja. Koska mittausta suoritetaan jatkuvana, mittauksessa syntävä virhe luo pistepilven paksuuden kun laserkeilain mittaa jo keilatulle alueelle eri arvoja pisteiden positiolle kolmiulotteisessa koordinaatistossa.

Resoluutio on yksi pistepilven pääominaisuuksista, joka määrittelee näkyvien yksityiskohtien tason skannausdatassa. Pistepilven pisteiden välille muodostuvien kolmioiden koko kuvaa resoluutiota millimetreinä. Mitä korkeampi resoluutio on, sitä tarkempi pistepilvi. Tämä tarkoittaa kolmioiden sivujen pituuden pienemistä ja samalla pistepilven tiedostokoon kasvua. (Creaform 2014a, 25.)

3.3 Mittalaitteet

Vaikkakin laserkeilaimet voidaan jaotella kahteen eri ryhmään niiden toimintaperiaatteen mukaan, käytännössä laserkeilaimet jaotellaan eri ryhmiin niiden toimintatarkoituksen perusteella. Nämä pääluokat ovat;

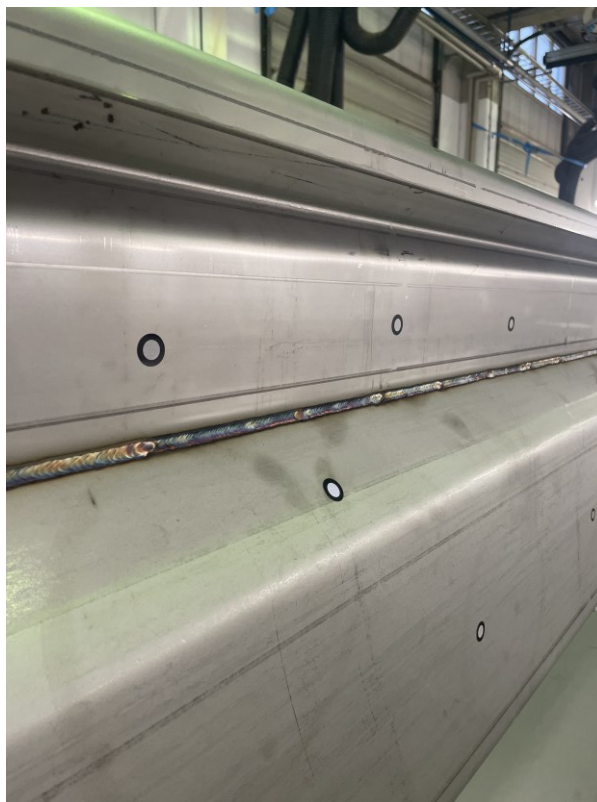
- kaukokartoitus-laserkeilaimet, joita käytetään esimerkiksi avaruusaluksista tai lentokoneista. Mittausetäisyydet ovat noin 0,1–100 kilometriä ja tarkkuus on noin 10 senttimetriä.
- maalaserkeilaimet eli terrestiaaliset laserkeilaimet, joita käytetään esimerkiksi maastonmittauksissa ja teiden pintamallinnuksissa. Mittausetäisyydet ovat noin 1–300 metriä ja tarkkuus on 20 millimetriä.
- teollisuuslaserkeilaimet, joihin kuuluvat 360° layout- skannaamiseen suunnitellut laserkeilaimet ja tarkempaan mitoitukseen suunnitellut käsikeilaimet. Layout- käyttöön suunniteltujen laserien mittausetäisyydet ovat noin 1–130 metriä ja tarkkuudet 1–5 millimetriä. Yksityiskohtaiseen laserkeilaamiseen suunniteltujen käsikeilaimien mittausetäisyydet ovat maksimissaan noin 10 metriä ja tarkkuudet parhaimmillaan 0,025 millimetriä. (Joala 2006, 1.)

Kehitämistutkimuksen selkeän mittauskohteen vuoksi työssä perehdyttiin teollisuuskäyttöön suunniteltujen mittauslaitteistojen eroavaisuuksiin ja mahdollisuuksiin tarkan mittauksen suorittamiseksi. Layout-keilaamiseen suunniteltujen mittalaitteiden tarkkuudet eivät olleet riittäviä suhteessa vaadittuun mittaustarkkuuteen, joten työssä päädyttiin perehtymään teollisuuskäyttöön suunniteltuihin käsikeilaimiin.

Käsikeilaimet jakaantuvat kahteen alaluokkaan: tavallisiin käsikeilaimiin, joiden paikkatieto perustuu stereoskooppiseen näköön ja keilaimiin, joiden sijaintimäärittelmä toteutetaan ulkoisen optisen seurantalaitteen avulla. Tavallisissa käsikeilaimissa kaksi kameraa mahdollistavat laitteen sijainnin määrittämisen tiettyihin pisteisiin nähden, jotka voivat olla sijoituspisteitä tai mitattavan kohteen pintoja. Seurantalaitteellisissa käsikeilaimissa on taas aktiivisia pisteitä mittalaitteen rungossa, joita ulkoinen seurantalaitte seuraa varmistaakseen tarkan sijainnin määrittämisen. (Creaform 2019a, 10.)

Stereoskooppisella tavalla toimivien ja ulkoisien seurantalaitteiden omaavien laserkeilaimien välillä ei ole juurikaan eroa niiden tarkkuuksissa, mutta skannattavan osan maksimikoko vaihtelee suuresti. Ulkoinen seurantalaitte mahdollistaa laserkeilaamisen huomattavasti suuremmille kappaleille. Tämä johtuu siitä, että ilman seurantalaitetta toimiva käsikeilaimen virhearvio omasta sijainnistaan ryömmii mittaustyön edetessä. Seurantalaitteellisella laserkeilaamisella vastaavaa ei pääse tapahtumaan, jos seurantalaitteella on näköyhteys keilaimen aktiivisiin paikkamäärittämisspisteisiin ja mitattavan kohteen kohdepisteisiin.

Laserkeilaamisessa mittauksen tarkkuutta parannetaan mitattavan kohteen pintaan kiinnitetyillä kohdepisteillä (kuva 3). Kohdepisteitä käytetään molemmilla käsikeilaintyypeillä. Seurantalaitteellisen käsikeilaimen optisen seurantalaitteen pitää nähdä mitattavan kappaleen kohdistuspisteitä, jotta seurantalaitte pystyy paikantamaan oman sijaintinsa xyz-koordinaatistossa. Mittauksen kohdistaminen kohdistuspisteiden avulla on ainoa tapa varmistaa metrologiatasoinen mittausdata laserkeilaimilla. (Creaform 2019b, 9.)



KUVA 3. Kohdistuspisteet höyrylaatikon rungossa.

3.4 Mittaustarkkuus, toistuvuus ja paikkansapitävyys

Termistö metrologiassa aiheuttaa usein sekaannusta varsinkin tarkkuuden, toistuvuuden ja paikkansapitävyyden osalta. Englanninkielinen termi *accuracy* sekoitetaan helposti termin *precision* kanssa ja kuvitellaan sen tarkoittavan tarkkuutta, vaikka mittaustekniikassa kyseisellä termillä tarkoitetaan mitatun arvon ja todellisen arvon paikkansapitävyyttä. Mittalaitteen, kuten laserkeilaimen paikkansapitävyyttä voidaan arvioida vertaamalla kyseisen mittalaitteen tuottamaa mittausdataa ja jonkin tarkemman mittausvälineen, esimerkiksi koordinaattimittakoneen avulla hankittuihin tietoihin. (Creaform 2014b, 14.)

Metrologiassa tarkkuudella (engl. *precision*) viitataan mittausten hajontaan. Mittalaitteella voidaan päästä mittausvirheellisesti hyvin lähelle nollaa, vaikka laite itsessään ei olisi hyvin tarkka. Toisin sanoen, mitä pienempi hajonta mittausdassassa on, sitä tarkempi laitteisto on. Tarkkuus määritellään muodollisesti toistuvilla mittauksilla samalle objektille samassa mittausympäristössä olosuhteiden pysyessä muuttumattomina. (Creaform 2014b, 13.)

Todenmukaisuus antaa tietoa mittauksien keskiarvon ja todellisen mitan välisestä erosta riippumatta hajonnasta. Mitä lähempänä mittauksien keskiarvo on nimellisarvoa, sitä parempi on laitteiston todenmukaisuus. Todenmukaisuuden määrittelyä on yhtäpitävyys äärettömän monen toistetun mitatun määrisen arvon keskiarvon ja viitearvon välillä. (Creaform 2014b, 14.)

3.5 Mittausvirheen osatekijät

Mittauksia ei voida koskaan toteuttaa absoluuttisen tarkasti, joka tarkoittaa, että mittaustuloksissa on aina virhettä. Mittausvirhe käsitteenä tarkoittaa havainnoitavan suureen todellisen arvon ja mitatun arvon erotusta. Mittausvirheen suuruudelle voidaan antaa arvio tekemällä toistomittauksia samalle mittaukselle. (Keinänen 2014, 95.)

Mittausvirheet voidaan jaotellaan kolmeen kategoriaan:

- karkea virhe
- systemaattinen virhe

- satunnainen virhe.

Karkeat virheet voivat johtua esimerkiksi mitta-asteikon lukemisesta väärin, mittalaitteen toimintahäiriöstä tai mittaustietojen tallentamisesta. Nämä virheet poikkeavat todellisesta mittaustuloksesta yleensä niin paljon, että virhe on helposti havainnoitavissa ja mittaustulos hylätään. (Keinänen 2014, 95.)

Systemaattinen virhe tarkoittaa toistuvaa mittausvirhettä, joka aiheutuu mittausmenetelmästä tai käytetystä mittalaitteesta. Väärän tarkkuuden mittauslaite tiettyyn mittaukseen tai mittalaitteen käyttäminen väärissä olosuhteissa aiheuttavat mittausvirhettä toistuvasti, eli systemaattisesti. Systemaattisen virheen todennäköisyyttä voidaan laskea kalibroimalla mittalaitteet standardien mukaisesti ja käyttämällä mittauslaitetta sille tarkoitettuun mittaukseen normaaleissa olosuhteissa. (Keinänen 2014, 95.)

Satunnaista eli tilastollista virhettä esiintyy aina kaikissa mittauksissa ja sen osuus kasvaa mitä tarkemmilla mittalaitteilla mitataan. Satunnaisen virheen vaikutuksen pystyy minimoimaan toistamalla mittauksen tarpeeksi monta kertaa, sillä eri suuntiin olevat mittausvirheet kumoavat toisensa. Kokeellisissa olosuhteissa satunnaiselle mittausvirheelle voidaan laskea arvio. (Keinänen 2014, 95.)

Kehittämistutkimuksen keskittyessä kahteen hyvin erilaiseen mittaustapaan ja mittalaitteistoon, on syytä nostaa esille mahdollisia mittausvirheitä aiheuttavia tekijöitä, joita mittauksissa mahdollisesti esiintyy. Laser- ja optisten mittalaitteiden osalta yksittäisiä mittausvirheitä muodostavia tekijöitä ovat muun muassa:

- mittauksen suorittaminen kiireellisesti
- kappaleen koko ylittää mittalaitteen maksimirajat
- mittausetäisyys on liian suuri
- mittaolosuhteet ovat epäpuhtaat
- mittauskappaleen asento vaihtuu mittauksen aikana
- mittauksen aikana tapahtuu lämpötilamuutoksia. (Keinänen 2014, 96.)

Tutkimuksessa verrataan laserkeilaamista mittausmenetelmänä luotilankamittaukseen, joka on luonteeltaan hyvin erilainen. Luotilankamittauksen toteutus on kuvattu yksityiskohtaisesti luvussa 5.1. Analogisilla mittalaitteilla suoritetuissa

mittauksissa käyttäjän tekemät mittausvirheet voivat vaikuttaa suuresti mittauksen lopputulokseen ja sen tarkkuuteen. Luotilankamittauksessa mahdollisia mitausvirheitä aiheuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi:

- parallaksivirheet, joissa mittalaitetta luetaan väärin
- mittaajan heikentynyt näkökyky
- epäselvä mittausohje
- muodoltaan vaikeasti mitattavissa oleva työkappale. (Keinänen 2014, 96.)

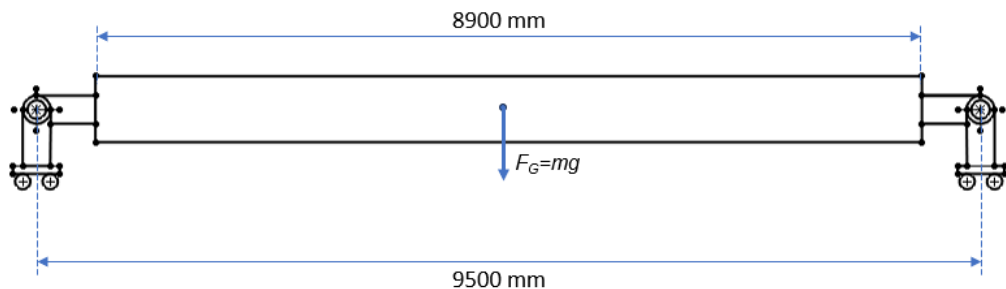
Optiset mittauslaitteet ovat yleisesti ottaen huomattavasti herkempiä reagoimaan ympäristötekijöihin. Laser- ja optiset mittalaitteet reagoivat välittömästi mitattavan kappaleen ja ympäristön lämpötilamuutoksiin, koska valon aallonpituus muuttuu lämpötilan vaikutuksesta. Tämä korostuu erityisesti pidempien etäisyyksien mittauksiin suunnitelluissa lasermittalaitteissa. Vastaavat mittalaitteet ovat myös huomattavasti herkempiä epäpuhtauksille esimerkiksi mittalaitteiden linseissä ja alttiimpia iskuista aiheutuville vaurioille ja kalibrointivirheille. (Keinänen 2014, 97.)

4 RAKENTEEN LUJUUS JA SUORUUS

Kehittämistutkimuksen alakysymyksenä tutkitaan höyrylaatikon lujuus- ja valmisteknisiä syitä muotovaihteluille. Luvussa käydään läpi höyrylaatikon lujuustekniset ominaisuudet ja pohditaan hitsausliitosten vaikutusta runkoprofiilin suoruteen. Tässä luvussa höyrylaatikkoa tutkitaan paineettomana, sillä tutkimuksen mittaustyöt suoritettiin paineettomalle laatikolle.

4.1 Lujuustekniset ominaisuudet

Höyrylaatikon rakenne vastaa lujuusopillisesti kotelopalkkia, joka on tuettu molemmista päistä laakerityylisellä tuentatyyppillä mahdollistaen kappaleen liikkeen sen pituussuunnassa. Tuennat eivät kuitenkaan olleet täysin kitkattomat, sillä höyrylaatikon kannakeputket lepäsivät kumipyörien päällä. Kyseiset tuennat kuitenkin estävät kappaleen joustavan liikkumisen pystysuunnassa. Kuviossa 12 on esitelty höyrylaatikon vapaakappalekuva, josta ilmenee kappaleen tuentatapaus. Vapaakappalekuvassa höyrylaatikkoa kuormittaa voima $F_G=mg$, jossa m on kappaleen massa ja g on vallitseva painovoima.



KUVIO 12. Höyrylaatikon vapaakappalekuva.

Etäisyys tuentojen välillä luo pitkän jännevälän suhteessa höyrylaatikon poikkileikkauksen profiiliin. Vaikka höyrylaatikkoa kuormittaa tapauksessa vain painovoiman ja massan muodostama voima, taipuu se hieman laatikon korkeussuunnassa. Laatikon poikkileikkauksen profiilin geometria määrittää taivutusvastuksen, joka kuvaa profiilin kykyä vastustaa taivutusta. Taivutusvastus saadaan laskettua yhtälöllä:

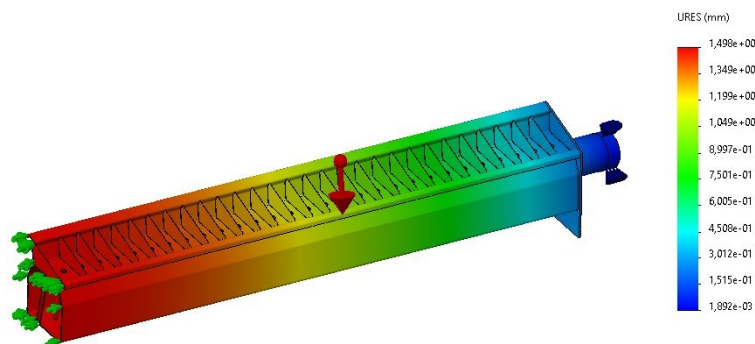
$$W_{z1} = \frac{I_z}{h_1}$$

Jossa, I_z = aksiaalinen neliömomentti ja h_1 = pintakeskiön etäisyys poikkileikkauksen alareunasta. (Salmi 2010, 178.)

Poikkileikkauksen profiilin muodot ja niiden suunta suhteessa y-akseliin määrittää aksiaalisen neliömomentin suuruuden (Salmi 2010, 177). Koska höyrylaatikon profiili koostuu useasta eri profiilin omaavasta kantatusta ohutlevystä, on neliömomentin laskeminen käsin hyvin työlästä.

Koska aksiaalinen neliömomentti määräytyy kappaleelle sen profiilin muotojen asennosta suhteessa vaikuttavan voiman suuntaan, höyrylaatikon kykyyn vastustaa taivutusta vaikuttaa sen poikkileikkauksen geometrian lisäksi sen käyttöasento. Tässä kehittämisselvityksessä tutkitun suunnikkaan muotoisen höyrylaatikon aksiaalinen neliömomentti olisi ollut alhaisempi, mikäli höyrylaatikko olisi ollut käyttöasennossa sen profiilin pidemmät sivut kohtisuorassa vaikuttavaan painovoimaan ja massan muodostamaan voimaan nähden.

Painovoiman aiheuttamaa taipumaa höyrylaatikon runko-osuudelle simuloitiin Solidworks 2020- suunnittelusovelluksella (kuvio 13). Simulaatiota varten höyrylaatikosta tehtiin yksinkertaistettu 3D-malli, joka vastasi rakenteeltaan mittaus työn ensimmäistä vaihetta. Rakenne kannakoitiin simulaatiossa vastaamaan tapaa, jolla laatikko oli kannakoitu laserkeilausta suoritettaessa mahdollistaen muotovertailun tuloksien vertaamisen simuloituihin tuloksiin.



KUVIO 13. Höyrylaatikon runkorakenteelle suoritettu FEM-simulointi.

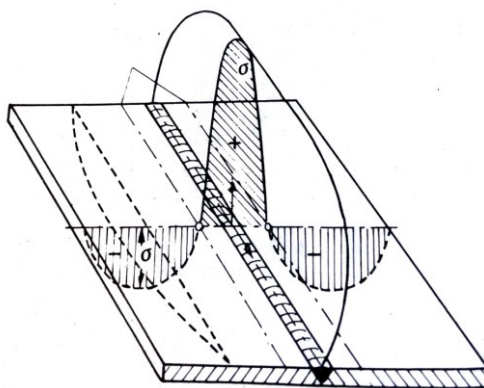
Kuviossa 13 nähdään FEM-simuloinnin tulokset siirtymien osalta. Kuvion oikeassa päässä olevat siniset nuolet kuvaavat simulointimallin kiinnitystä kannakeputkessa ja punainen nuoli ilmentää painovoiman kuormitusta ja sen suuntaa. Laatikko simuloitiin puolikkaana ja sen toinen puoli huomioitiin laskennassa käytämällä symmetriatyökalua.

4.2 Hitsausjännitykset

Jos hitsauksen aikana työkappale ei pääse liikkumaan vapaasti, hitsauksessa syntyvä lämpö aiheuttaa kappaleeseen hitsausjännityksiä, jotka muuttuvat sisäiseksi jännityksiksi ja reaktiojännityksiksi.

Reaktiojännitykset syntyvät jäykässä hitsausliitoksessa, kun kappaleeseen vaikuttaa ulkoinen voima, joka estää sen kutistumisen hitsauksen aikana. Koska reaktiojännitykset syntyvät jäykän kiinnityksen seurauksena, niiden syntymistä voidaan vähentää tai poistaa sallimalla kappaleen vapaa liike hitsauksen aikana. Toisaalta kappaleen vapaa liikkuminen mahdollistaa suuremman kulmamutoksen syntymisen hitsattavien osien välille. (Blom 1975, 1.)

Kun kaksi vapaasti liikkuvaa kappaletta hitsataan toisiinsa, ei reaktiojännityksiä pääse syntymään, mutta hitsausliitoksessa voi silti ilmetä sisäisiä jännityksiä. Suurissa työkappaleissa perusaine estää hitsaussauman pituussuuntaisen laajenemisen aiheuttaen voimakasta plastista muokkautumista hitsin vieressä sijaitsevaan perusaineeseen. Tämän muodostaa suuria sisäisiä jännityksiä (kuvio 14), eli jäännösjännityksiä työkappaleeseen. (Blom 1975, 1.)



KUVIO 14. Sisäisten jännityksien aiheuttama pitkittäissuuntainen vetojännitys (Blom 1975, 2).

Hitsaussauman kutistumistarve on suuremman lähtölämpötilan vuoksi suurempi kuin perusaineen. Vahva hitsaussauma ei kuitenkaan pääse kutistumaan perusainetta enempää aiheuttaen kappaleeseen jännityksiä. Kuviossa 15 on esitelty V-railohitsin sisäisten jännitysten jakautuminen kappaleen pituussuunnassa. Sisäisien jännityksien syntymistä ei voida estää reaktiojännityksien tapaan, joten myös vapaasti hitsatuissa kappaleissa esiintyy aina sisäisiä kutistumisjännityksiä. (Blom 1975, 2.)

Työkappaleeseen kohdistuva lämpötila, joka vaaditaan muodonmuutoksien ja jännitystilojen syntymiseen voidaan laskea yhtälöllä:

$$T = \frac{\sigma_m}{E \cdot \alpha}$$

jossa σ_m on myötöraja, E perusaineen kimmomoduuli ja α on lämpölaajenemiskerroin.

Haponkestävällä teräksellä kyseinen lämpötila on noin 99°C. Hitsauksessa kyseinen lämpötila ylitetään, jolloin seurauksena on jäännösjännityksien syntyminen. (Blom 1975, 4.)

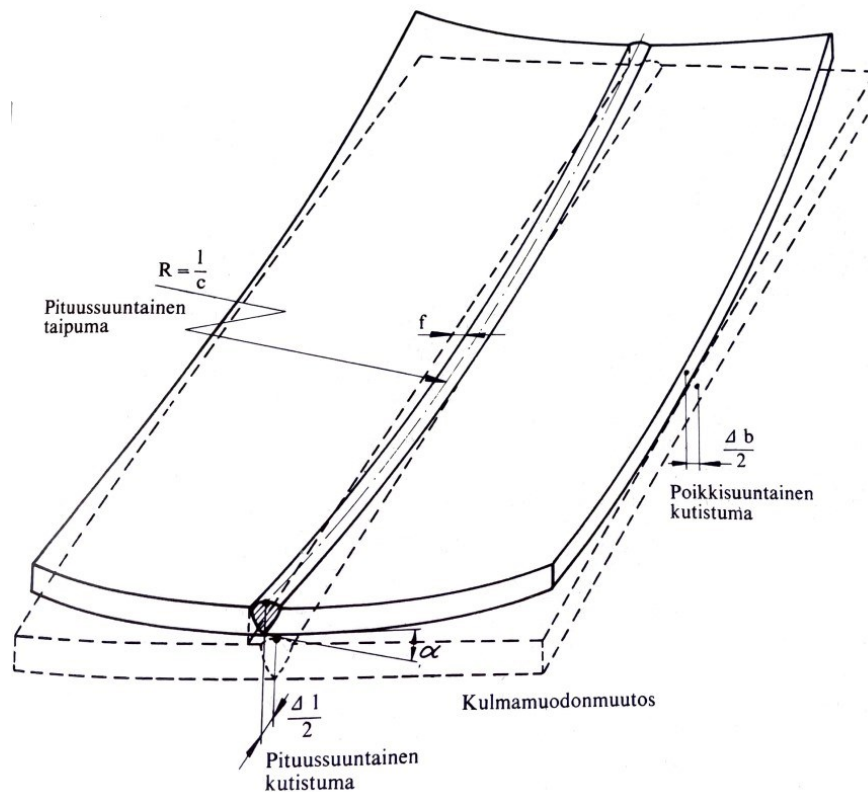
Lämpötilan aiheuttamat muodonmuutokset voidaan jakaa kolmeen osioon:

- metallikiteissä tapahtuviin muodonmuutoksiin
- atomihilassa tapahtuviin muodonmuutoksiin
- koko hitsauskokoontanossa tapahtuviin muodonmuutoksiin (Blom 1975, 5.).

Hitsauskokoontanoja käsitellessä tärkeimpänä tarkastelukohteena nousee esille koko rakenteessa tapahtuvat muodonmuutokset. Muodonmuutoksien suuruus ja niiden suunta vaihtelevat hitsaussaumoista johtuvan lämpömäärän mukaan ja ne voidaan jakaa tilapäisiin ja pysyviin muodonmuutoksiin. Pysyvät muodonmuutokset (kuvio 15) jaotellaan käytännön näkökulmasta katsottuna seuraavasti (Blom 1975, 5.):

- pituussuuntainen kutistuma

- pituussuuntainen taipuma
- poikkisuuntainen kutistuma
- kulmamuodonmuutos. (Blom 1975, 5.)

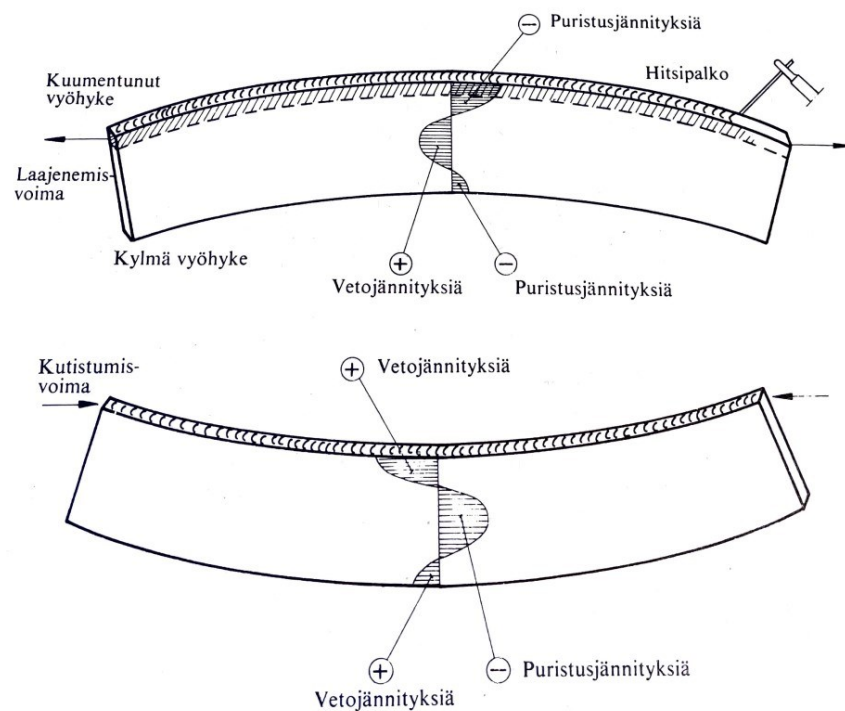


KUVIO 15. Edellä mainitut pysyvät muodonmuutokset esiteltynä (Blom 1975, 5).

Pituussuuntainen kutistuma aiheutuu yleisesti hitsin ja sitä ympäröivän perusaineen lämpövyöhykkeen jäähtymisen seurauksesta. Kutistuman suuruudelle saadaan arvo mittaamalla kappaleen akselipituus ennen hitsausta ja hitsaamisen jälkeen. Teräsrakenteissa pituussuuntainen kutistuma on yleensä pieni, noin 0,03–0,1 % hitsin kokonaispituudesta. Kutistuman kokonaispituuteen vaikuttaa perusaineen lämpölaajenemiskerroin. Esimerkiksi alumiinihitsauksissa pituussuuntaiset kutistumat ovat noin kaksi kertaa suuremmat verrattuna samanpituisiin teräshitsauksiin. (Blom 1975, 6.)

Hitsausauman sijainti verrattuna työkappaleen neutraaliakseliin määrittää hitsin aiheuttamien pysyvien muodonmuutoksien tyypit. Hitsausauman sijaitessa kappaleen neutraaliakselilla, kappaleessa tapahtuu vain pituussuuntaista kutistumaa. Jos hitsausauma ei sijaitse kappaleen neutraaliakselilla, saa hitsausauman kutistuma aikaan kappaleessa pituussuuntaista taipumaa (kuvio 17).

Pituussuuntainen taipuma kappaleessa aiheutuu epätasaisesta lämmönjakautumisesta kappaleeseen hitsattaessa. Hitsauksesta aiheutuva paikallinen lämpö saa kappaleen lämpölaajenemaan sen toiselta puolelta ja hitsauksen jäähtyessä sauman kutistuma aiheuttaa hitsatulle puolelle vetojännityksiä. Muodonmuutoksia tapahtuu kappaleessa eniten kuumentuneella alueella, jossa koheesiovoimat vaikuttavat. Kuviosta 16 voidaan havaita hitsausauman aiheuttama laajenemisvoima kappaleen yläpinnassa. Hitsausauman jäähtyessä sen suurempi kutistumistarve verrattuna perusaineeseen aiheuttaa kutistumisvoiman, joka lopulta saa aikaan pysyvät muodonmuutokset. (Blom 1975, 6–7.)



KUVIO 16. Lämpölaajenemisen ja kutistumisen aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset (Blom 1975, 7).

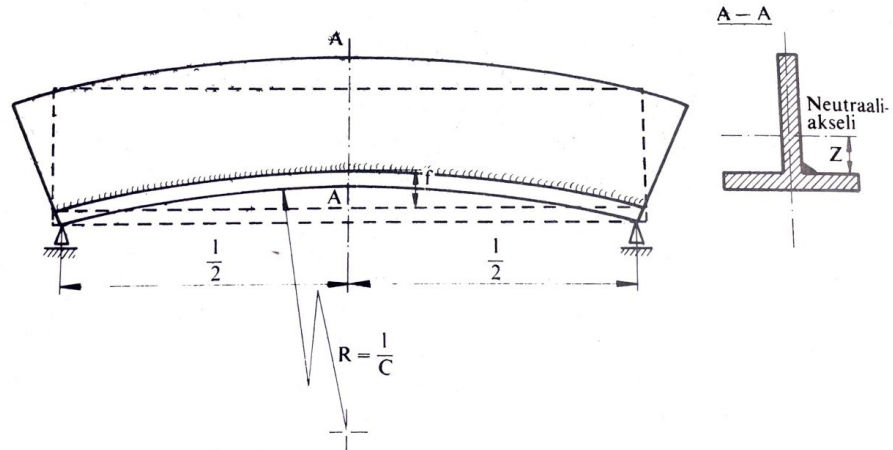
Pituussuuntainen taipumasuuruus voidaan likimäärin arvioida yhtälöllä:

$$R = \frac{1}{C}$$

Jossa taipuman kerroin C on

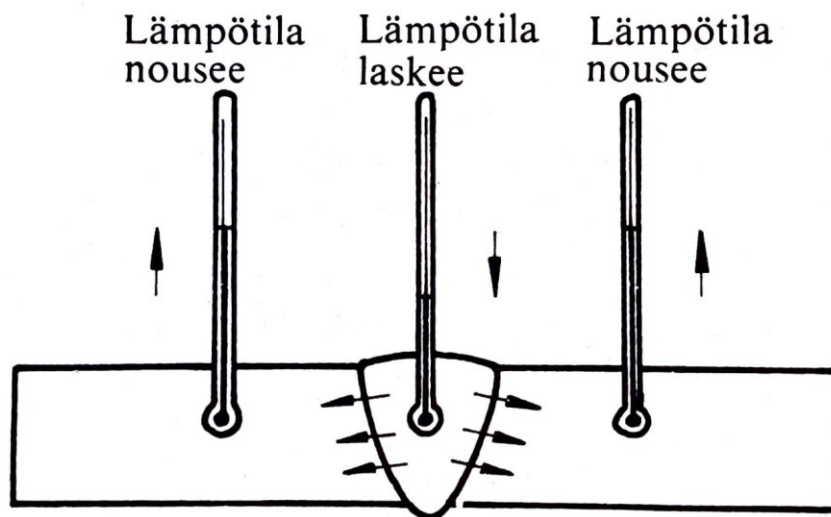
$$C = 3.53 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0.24 \cdot U \cdot I}{v} \cdot \eta \cdot \frac{Z}{J}$$

Jossa U on kaarijännite, I on hitsausvirta, v on hitsausnopeus senttimetreinä sekunnissa, η on lämmönhyötykerroin, Z on etäisyys kappaleen neutraaliakselilta hitsin pituusakselille ja J on kappaleen neliömomentti. (Blom 1975, 7.)



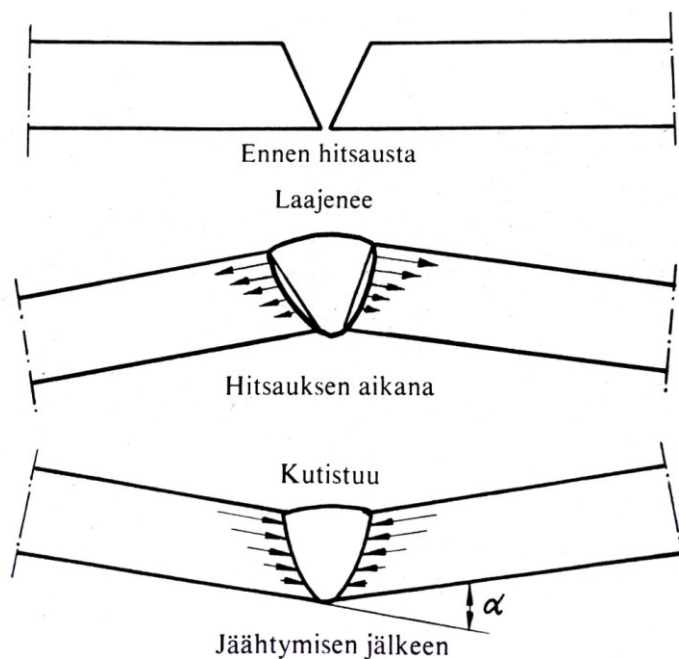
KUVIO 17. Palkin pituussuuntaisen taipuma (Blom 1975, 8).

Poikkisuuntainen kutistuma syntyy, kun hitsauksen edetessä sula metalli alkaa jäähtymään ja kutistumaan lämmönlähteen siirtyessä eteenpäin. Lämmönlähteen siirtyminen eteenpäin saa aikaan perusaineen uudessa kohdassa lämpölaajenemista hitsauksen edetessä. Valmiin hitsin jäähtyessä ja samalla supistuessa, sen läheisyydessä olevan perusaineen lämpötila sen sijaan vielä nousee ja perusaine laajenee (kuvio 18). Lopulta tietyn ajan jälkeen myös perusaineen lämpötila alkaa laskea aiheuttaen supistumista. Poikkisuuntainen kutistuma syntyy hitsin ja sitä ympäröivän perusaineen jäähtyessä korkeista lämpötiloista ja samalla kutistuessa. (Blom 1975, 9–10.)



KUVIO 18. Lämpötilan muutokset hitsausauman edetessä (Blom 1975, 11).

Kulmamuuotos työkappaleessa aiheutuu poikkisuuntaisesta kutistumasta, joka lämmönjakautumisen epätasaisuuden takia on erilainen eri levyvahvuuksilla. Esimerkiksi kahden levyn välisessä V-railohitsissä lämpöä johtuu levyihin enemmän railon avonaiselle puolelle kuin railon pohjan puolelle (kuvio 19). Tämä aiheuttaa kahden levyn välille kulmamuuoksen liitoksen kutistuessa toispuoleisesti. (Blom 1975, 19.)



KUVIO 19. Kulmamuuotos levyjen välisessä railohitsauksessa (Blom 1975, 19).

4.3 Hitsauksien oikominen

Hitsauksesta aiheutuvat lämpötilamuutokset saavat aikaan muodonmuutoksia työkappaleissa. Muodonmuutoksiin voidaan reagoida huomioimalla hitsausjärjestykset, liitoskulmat ja työlämpötilat, mutta aina muodonmuutoksilta ei voida välttyä. Rakenteellisia muodonmuutoksia voidaan kuitenkin oikoa termodynaamisesti tai mekaanisesti.

Mekaanisella oikomisella tarkoitetaan yleisesti vasarantamista, jossa hitsausaamaa naputellaan vasaralla esimerkiksi alasinta vasten. Vasarantamisella saadaan aikaan hitsausauman jännityksien aleneminen, mikä oikaisee hitsauskoonpanoa. Mekaaniseksi oikomiseksi luetaan myös puristimilla oikominen, jossa taipunutta kappaletta väännetään taipumaa vastaan. Molemmat tavat toimivat hyvin ohutseinäisille tai pienikokoisille kappaleille. Mekaanisella oikomisella on kuitenkin haittapuolensa. Kylmänä suoritettu mekaaninen oikominen voi aiheuttaa kappaleeseen halkeamia, säröjä, repeämiä ja aineen haurastumista.

Suurten hitsauskoonpanojen oikomisessa hyödynnetään usein ulkoista lämmönlähdettä. Kappaleen kuumentamisessa kuumennusliekki kohdistetaan paikallisesti kokoonpanon niihin osiin, joihin ei ole aiheutunut hitsauksesta plastisia muodonmuutoksia. Kuumennuskohtien koolla, sijainnilla ja muodolla pyritään aikaansaamaan plastista muodonmuutosta vastakkaiselle puolelle muodonmuutoksia aiheuttaneita hitsausaumoja niin, että niiden aikaansaamat jännitykset kumoavat hitsausaumojen muodostamat jännitykset. (Blom 1975, 25.)

Rakenteen oikaiseminen voidaan toteuttaa hyödyntämällä kuumentamista ja vasarantamista, jolloin puhutaan kuumana oikaisemisesta. Kuumana oikaisemisessa kappale kuumennetaan yleisten rakenneteräksien ollessa kyseessä noin 600°C:n lämpötilaan ja itse oikominen toteutetaan mekaanisesti hyödyntämällä vasarantamista tai ulkoisia puristimia. (Blom 1975, 27.)

Jos oikaisu suoritetaan pelkästään hyödyntämällä ulkoista lämpötilaa jättämällä mekaaninen osuus pois, puhutaan kuumilla oikomisesta. Kuumennettaessa levyä paikallisesti tapahtuu teräksen lämpölaajenemisesta johtuva perusaineen

tyssääntyminen siinä alueessa, jonka lämpötila on kohonnut yli 300°C:n lämpötilaan. Lämpölaajenemisen jälkeen kuumennettu kohta supistuu aiheuttaen vetojännitystilaa ja suoristaen taipunutta profiilia. (Blom 1975, 27.)

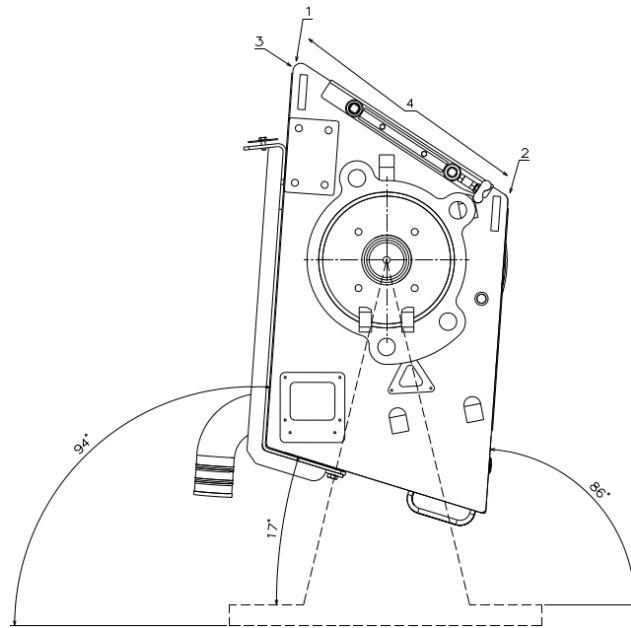
5 LOPPUMITOITUSTARKASTELU

5.1 Luotilankamittaus

Höyrylaatikoiden suoruus ja kierous tarkastusmitataan kuvion 20 mukaisesti hyödyntäen luotilankaa. Mittauksessa luotilanka pingotetaan laatikon runkoprofiilin yläpuolelle noin 10 millimetrin korkeuteen kumipalojen avulla. Pingotettu lanka muodostaa suoran laatikon profiilin yläpuolella, joka toimii referenssipisteenä suoruusmittaukselle.

Mittaus suoritetaan mittaamalla profiilin etäisyys luotilangasta noin puolen metrin välein höyrylaatikon laatikko-osuudella. Jos esimerkiksi laatikon keskikohdassa profiilin ja luotilangan välinen etäisyys on 14 millimetriä, tämä tarkoittaa, että höyrylaatikon keskivaihe roikkuu neljä millimetriä suhteessa laatikon käyttö- ja hoitopään välille muodostuneeseen nollatasoon.

Mittaustyön tarkkuus on hyvin kyseenalainen sen monen muuttujan seurauksena. Luotilangan paksuus suhteessa mitta-asteikkoon luo haasteita oikean mitaustuloksen lukemiseen ja langan mahdollinen roikkuminen ja värähtely laskevat mittauksen luotettavuutta. Mekaanisessa mittaustyössä esiintyykin luvussa 3.5 esille tuotuja mittausvirheen osatekijöitä.



Straightness (1, 2, 3) and twisting (4) must be in ± 3 mm on operation temperature.
Operatin position, beam supported at bracket positions.

Suoruus (1,2,3) ja kierous (4) oltava v \pm 3 mm k \ddot{u} yt \ddot{u} sl \ddot{u} p \ddot{u} t \ddot{u} tilassa.
K \ddot{u} yt \ddot{u} soasento, tuettu kannattimien kohdalta.

KUVIO 20. Suoruuden ja kierouden mittaustarkastelu (Valmet 2023b).

5.2 Mittaustyön suunnittelu

Mittaustyö lähti käyntiin suunnittelulla, jossa tehtiin esiselvitys laserkeilauksen vaatimuksille ja mittauksen tilojen toteutukselle. Työn pohjana hyödynnettiin osaksi vanhaa luotilankamittausta ja höyrylaatikoille asetettua mittaustarkastusohjetta, sillä tämä mahdollisti uuden ja vanhan mittaustavan tuloksien vertaamista toisiinsa.

Mittaustarkastelu kohdistui höyrylaatikon profiilin yläpintaan (kuvio 20), joka oli mittaustyön kannalta optimaalista, sillä höyrylaatikon CD- suunnassa profiili oli ainoa rungon näkyvä osa, joka näkyi jokaisessa kolmessa eri valmistustilassa.

Höyrylaatikon laserkeilaus toteutettiin kolmessa eri tilassa:

- runkovaihe
- runkovaihe, lämmöllä suoristettu, eristetty ja vuoripellit kiinnitetty
- valmis höyrylaatikko, toimilaitteet ja loput muotolevyt kiinnitetty.

5.3 Mittauslaitteisto

Mittaustyön suunnannäyttäjänä toimi Valmet Automationin määrittämät toleranssit höyrylaatikoiden suorudelle ja kieroudelle. Höyrylaatikoiden suuret pituudet ja tiukat toleranssit loivat haasteita löytää sopivaa mittalaitetta työn suorittamiseen. Monelta eri valmistajalta saatavissa olevat teollisuuskeilaimet eivät soveltuneet mittatarkkuuden puolesta tähän työhön ja alhaisemman hintaluokan käsi-keilaimien maksimipituus mitattavalle kappaleelle ylittyi. Alhaisen mittaustoleranssin seurauksena mittalaitteistolta vaadittiin erityistä tarkkuutta, johon layout-tyyppiset laserkeilaimet eivät suoritusarvoiltaan olleet riittäviä. Näin vaihtoehdoksi jäi seurauslaitteellinen käsi-keilain.

Kehittämistutkimuksen mittauslaitteistoksi valikoitui Creaform MetraSCAN BLACK ELITE- optinen koordinaattimittakone (kuva 5) yhdessä C-Track- seurainlaitteen kanssa. Valintaan vaikutti vaadittu tarkkuus ja kappaleen koko, joihin kyseinen laitteisto soveltui hyvin. Mittalaitteisto löytyi valmiiksi hankittuna höyrylaatikoiden valmistajalta, joten tutkimuksen kustannuksien pitämiseksi alhaisena oli luontevaa hyödyntää tämä mahdollisuus suorittaa työ jo valmiiksi hankituilla laitteilla.

5.4 Mittaustyön toteutus

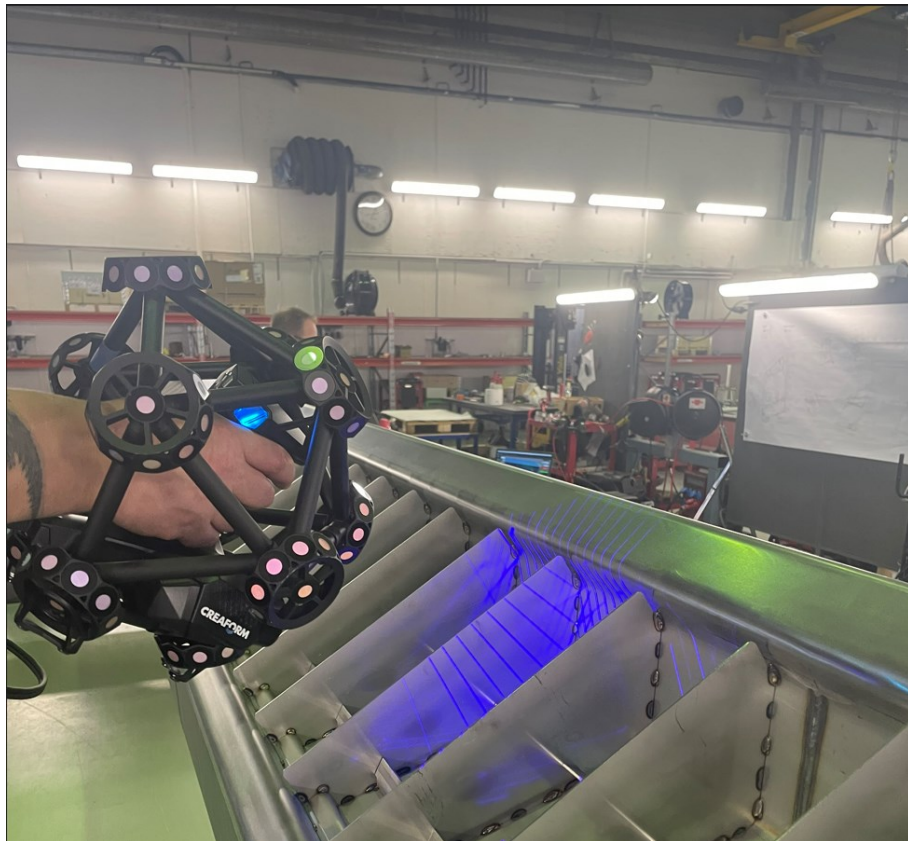
Jotta kolmesta eri laserkeilaustilasta saatiin yhteneväisiä ja vertailukelpoisia, oli laserkeilaus toteutettava samassa asennossa jokaisessa vaiheessa. Asennoksi valikoitui höyrylaatikon lopullinen käyttöasento, johon höyrylaatikko asennetaan tehtaalla. Tuenta toteutettiin alihankkijan pukeilla (kuva 4), jotka mahdollistivat höyrylaatikon MD- suuntaisen kulman säätämisen käyttöasentoon. Säätäminen käyttöasentoon toteutettiin kulmamittarin ja kannakepukkien sähkömoottorien avulla.



KUVA 4. Höyrylaatikon kannakointi pukeilla runkovaiheessa.

Mittaustyö itsessään tarvitsi tilaa, sillä seurantalaitteellisessa laserkeilaamisessa seuraimen pitää jatkuvasti nähdä keilattavan kappaleen kohdennuspisteet ja käsikeilaimen aktiiviset paikkaseurantapisteet. C-Track asetettiin samansuuntaisesti noin kahden metrin päähän mitattavasta höyrylaatikosta. Tällä etäisyydellä saatiin mahdollistettua laatikko-osuuden keilaaminen vastapuolelta ilman, että laatikko olisi peittänyt käsikeilaimen ja seurantalaitteen välistä näköyhteyttä.

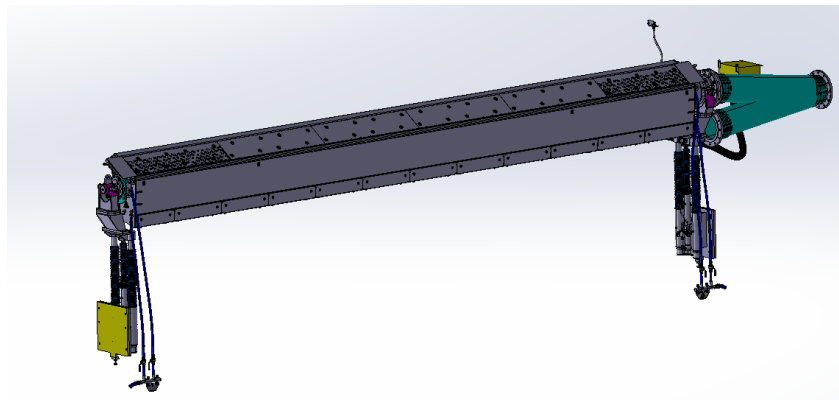
Mittauksessa työn edistymistä seurattiin VXelements- sovelluksella kannettavan tietokoneen näytöltä. Sovellus kertoi mittauksen suorittajalle reaaliajassa numeerisia arvoja seuraimen ja käsikeilaimen välisestä näköyhteydestä. Lisäksi sovellus indikoi mittauksen etenemistä prosenteissa ja varoitti jos käsikeilaimen ja mittauskohteen etäisyys kasvoi liian suureksi.



KUVA 5. Laserkeilaus Creaform MetraSCAN BLACK ELITE- optisella koordinaattimittakoneella.

5.5 Muotovertailut

Työssä tutkittiin höyrylaatikon tilaa kolmessa eri valmistusvaiheessa, joten muotovertailuja oli vastaavaan tapaan suoritettava kolme. Jokaisella mittauskerralla höyrylaatikko oli osiltaan erilainen, joten jokaista muotovertailua varten 3D- malli oli muokattava (kuva 6) vastaavaan tilaan. Muokkaus toteutettiin Solidworks 2020- suunnittelusovelluksella.



KUVA 6. Muokkaamaton .STEP- malli höyrylaatikosta.

Koska höyrylaatikon 3D-malli on rakennettu valmistuskuvia varten, oli STEP-mallista poistettava paljon osia, jotta se saatiin vastaamaan jokaista mittausvaihetta. Poistettavien osien piilottaminen toteutettiin valitsemalla ne piirrepuussa ja käyttämällä supressio-komentoa. Työvaiheena tämä oli yksinkertainen, sillä STEP-malleissa osien piilottaminen tai poistaminen kokonaan ei riko kokoonpanon relaatioita, joten malli ei voi hajota eri kokonaisuuksiksi.

Muotovertailut ja suoruustarkastelu suoritettiin pistepilvien ja STEP-mallien välille Creaform VXelements- sovelluksessa käyttämällä yhden kuukauden ilmaista trial- lisenssiä. VXelements sisältää usean eri työkalun liittyen pistepilvien mittamiseen, tutkimiseen ja muokkaamiseen, mutta työn muotovertailun vuoksi päädyttiin käyttämään VXelements Analysis- osaa, joka mahdollisti 3D-mallin ja pistepilven päällekkäin sijoittamisen. Muotovertailujen tavoitteena oli saada näkyviin lämpökartta, josta selviäisi todelliset vääntymät ja mittaerot verrattuna suoraan 3D-malliin.

Muotovertailuissa haasteellisin osuus oli pistepilven ja 3D-mallin kohdistaminen toisiinsa johtuen kappaleen pituudesta. Vaikka kohdistus olisi tarkka käyttöpäässä, pieni virheasento saattoi aiheuttaa suuren virheen höyrylaatikon hoitopäässä suhteessa toleranssiin. Lisäksi pistepilven ja 3D-mallin kohdistaminen määrittää muotoeroavaisuuksien suunnat. VXelements Analysis mahdollistaa pistepilven ja 3D-mallin kohdistamisen alla olevilla tavoilla:

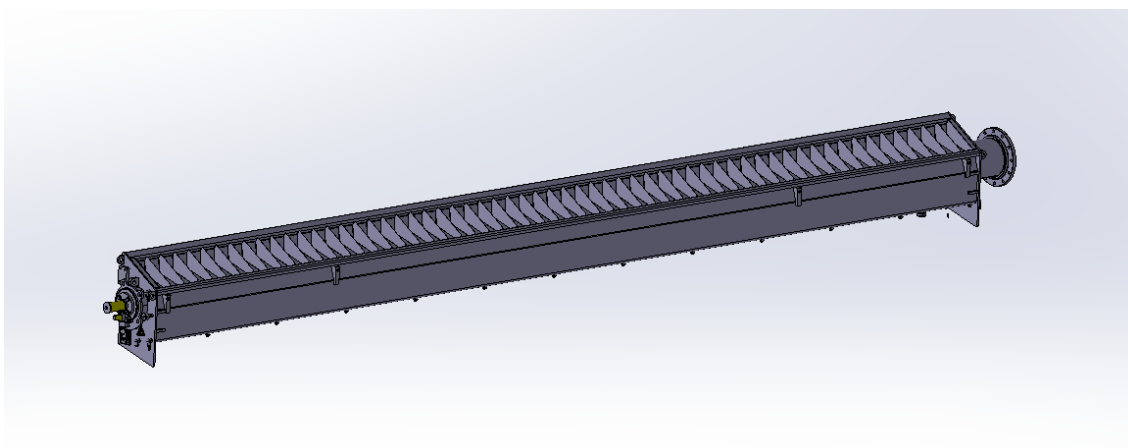
- sovitus pintojen mukaan, engl. surface best fit
- pisteiden valinta, engl. point selection
- kohteiden valinta, engl. entity selection
- kohdennettu paras sovitus, engl. target best fit
- RPS- kohdistus, engl. RPS alignment
- manuaalinen kohdistus, engl. manual alignment
- tuontikohdistus, engl. import alignment.

Koska opinnäytetyön aiheena oli tutkia laserkeilauksen mahdollisuuksia höyrylaatikoiden loppumitointitarkastelussa, oli syytä kokeilla useampaa kohdistustapaa ja etsiä niiden hyödyt ja heikkoudet. Yleisesti ottaen kohdistamista pintojen keskiarvovirheiden mukaan pidetään tehokkaimpana kohdistusmenetelmänä,

kun verrataan kohdistamiseen menevää aikaa ja sen tarkkuutta. Tässä työssä pintojen mukaan sovittaminen luo kuitenkin haasteita, sillä höyrylaatikon näkyvien pintojen suoruus vaihtelee laajalti eri tiloissa. Ensimmäisessä vaiheessa höyrylaatikon näkyvät pinnat ovat runko-osuutta, jolloin näkyvien pintojen CD-suoruus on oletusarvoista. Toisessa ja kolmannessa vaiheessa höyrylaatikon ulkokuoressa näkyvien vuoripeltien suoruus on kyseenalaistettava johtuen levyjen ohuesta ainevahvuudesta ja pitkistä hitsausaumoista. Voidaankin todeta, että kohdistus pintojen mukaan toimii varmemmin tapauksissa, jossa näkyvät pinnat ovat oletusarvallisesti suorassa.

5.5.1 Muotovertailun ensimmäinen osuus

Kuvassa 7 on esitelty muokattu STEP-malli, joka vastasi ensimmäisen mittauskerran höyrylaatikkoa osiltaan. Mallin muokkaamisen ja tallentamisen jälkeen höyrylaatikko oli valmis muotovertailuun.



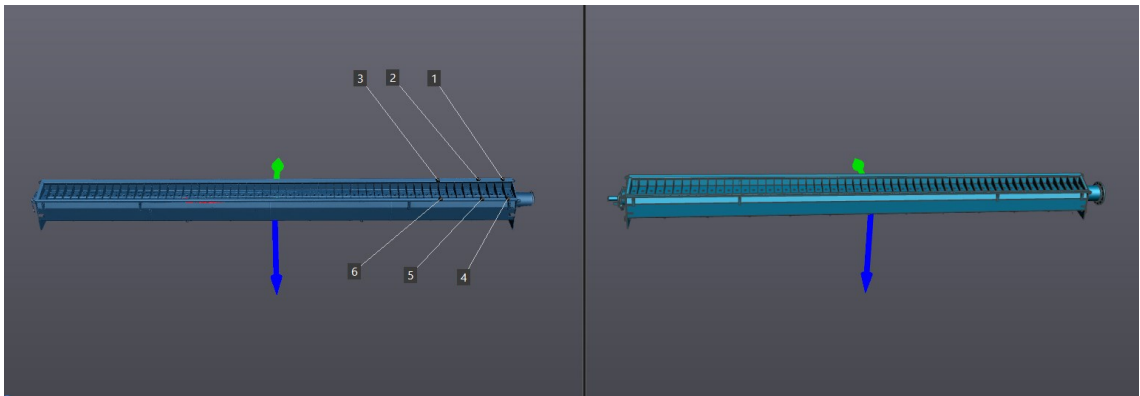
KUVA 7. Muokattu STEP-malli vastaamaan ensimmäistä valmistustilaa.

Ensimmäisessä muotovertailussa pistepilveen muokattiin näkyvien pintojen mukaan kohteet, engl. entities, hyödyntämällä höyrylaatikon päissä olevia höyrynsyöttöputkia. Sylinterinmuotoiset putket mahdollistivat piirtämään ympyräsylinteritluonnokset ja muodostamaan lävistäjän niiden välille. Lävistäjän ja pätylevyjen törmäyskohtien avulla malliin muodostettiin kaksi pistettä. Tämän jälkeen oli mahdollista määrittää koordinaatisto pistepilven keskelle käyttäen kahden pisteen välille muodostunutta akselia, höyrylaatikon päätyjä ja sen takaseinää. Tämän jälkeen kohdistaminen toteutettiin valitsemalla muokatut kohteet ja 3D-mallin koordinaatisto.

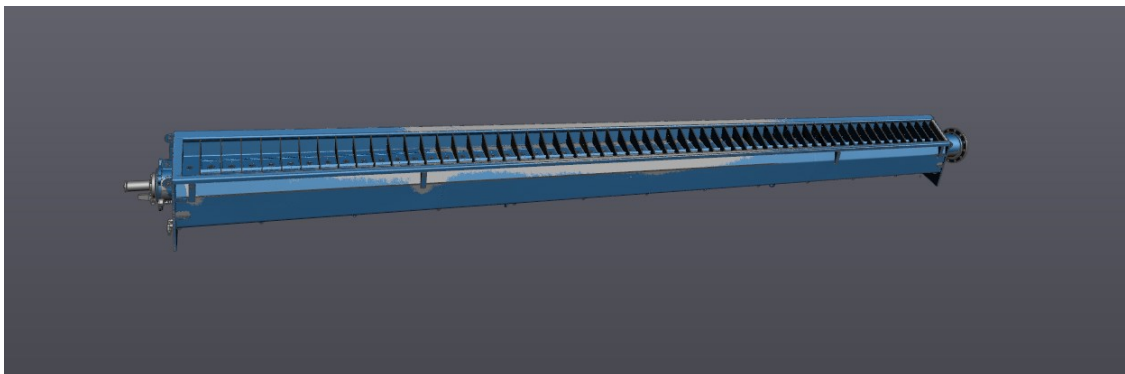
Kohdistaminen koordinaatiston origon, höyrylaatikon päiden välisten sylinterien lävistäjän ja takaseinän tason avulla osoittautui kuitenkin epätarkaksi, joten lopullinen kohdistaminen päädyttiin toteuttamaan toisella tavalla. Parhaimmaksi tavaksi osoittautui sovitus pintojen mukaan engl. surface best fit.

Sovituksessa pintojen mukaan VXelements- kohdistaa 3D-mallin ja pistepilven näkyvien pintojen mukaan niin sanotusti parhaalla mahdollisella tavalla. Tämä tarkoittaa, että sovellus sijoittaa kohdistettavat kappaleet toistensa kanssa sisäkkäin niin, että pintojen sijaintivirhe on minimaalinen. Sovellus vaatii kohdistettaville kappaleille esisijoituksen, jotta sijoituksen pintojen mukaan voi toteuttaa

Esisijoituksen vaativassa kohdistamisessa käyttäjä valitsee pisteitä ensin pistepilvestä ja sen jälkeen vastaavista kohdista 3D-mallista (kuva 8). Jos pisteitä valitsee vuorotellen yksi kerrallaan pistepilven ja 3D-mallin välillä, VXelements- alkaa suorittamaan kohdistamista niin, että käyttäjä näkee oman työnsä jäljen (kuva 9). Tämä mahdollistaa virheellisten kohdistuspisteiden poistamisen tai tietyn pinnan priorisoinnin, joka parantaa lopullisen kohdistuksen tarkkuutta käyttäjän haluamilla pinnoilla.



KUVA 8. Esisijoituksen toteuttaminen VXelements- ohjelmistossa.



KUVA 9. Kohdistus sovitettujen pintojen mukaan esisijoituksella.

5.5.2 Muotovertailun toinen osuus

Toisen muotovertailun toteuttaminen osoittautui haasteelliseksi ulkopinnassa olevien vuoripeltien vuoksi. Höyrylaatikkoon kiinnitettyjen vuoripeltien pysty- ja pituussuuntaiset hitsausseamit olivat aiheuttaneet muodonmuutoksia levyjen näkyvien pintojen suoruuteen, jotka olivat havaittavissa silmämääräisesti. Ensimmäinen muotovertailu osoitti, että pistepilven kohdistaminen itse luotujen kohteiden avulla oli haasteellista ja sovittaminen pintojen mukaan epätarkempaa, jos suuri osa laserkeilatun höyrylaatikon pinta-alasta ei vastannut 3D-mallia.

Tässä vaiheessa työtä ja muotovertailujen suorittamista oli jo kuitenkin tiedossa surface best fit- sovituksen nopeus ja helppous. Täytyy huomioida, että kehittämistutkimuksen päämääränä oli laserkeilauksen mahdollisuuksien selvittäminen höyrylaatikon mittausmenetelmänä, jolloin työn suorittamisen nopea toteutus olisi pakollista mittausmenetelmän hyödyntämisen kannalta. Vaikka lähtökohdat kohdistamiseen ensimmäistä muotovertailua vastaavalla tavalla olivat huonot, päädyttiin se silti toteuttamaan mahdollisten huomioiden ja mittauseroavaisuuksien havainnollistamiseksi. Tätä kohdistamistapausta tuki myös tietoisuus kolmanesta muotovertailusta, jossa höyrylaatikon valmistustilan eroavaisuus oli pienempi verrattuna ensimmäiseen muotovertailuun.

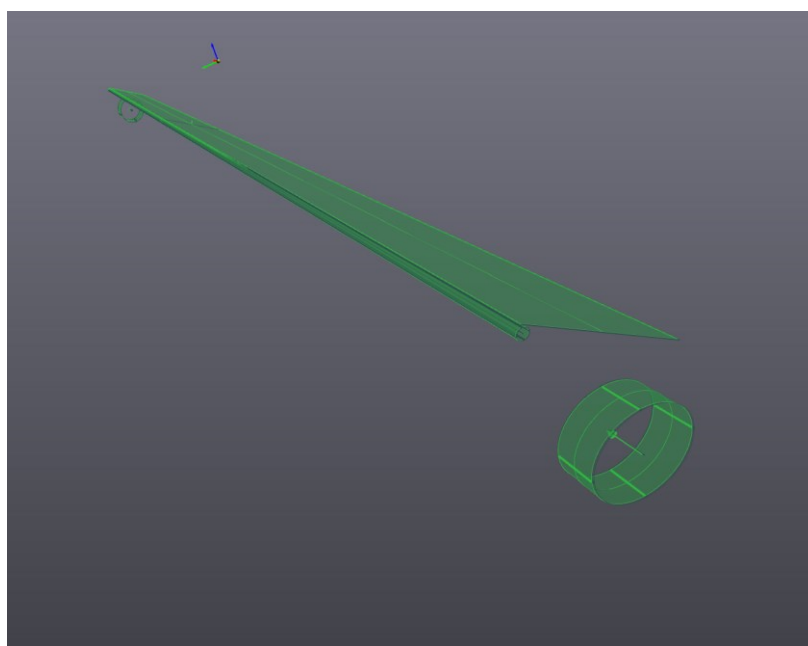
Kuten oletettua, kohdistaminen pintojen mukaan osoittautui hankalaksi. Kohdistaminen toteutettiin neljä eri kertaa valitsemalla kohdistuspisteitä eri osista runkoprofiilia. Pääkohdistuspintana esikohdistamisessa pidettiin profiilin kahta tasaista pintaa valitsemalla siihen enemmän esikohdistuspisteitä. Höyrylaatikkoa

yritettiin sitoa esikohdistuksessa myös runkoprofiilin taivutusalueelta virtauslaatikon sisältä, jotta estettäisiin kohdistamisen notkahdus x- akselilla.

5.5.3 Muotovertailun kolmas osuus

Kolmannessa muotovertailussa höyrylaatikko oli valmistusteknisesti lopullisessa tilassa. Yläprofiliin kiinnitetyt diffuusiiolevyt vähensivät näkyvän runkoprofiilin osuutta laatikon kokonaispinta-alasta entisestään, joten kohdistamiseen piti löytää toinen ratkaisu sen onnistumisen varmistamiseksi. Lisäksi laatikon takaosuu-teen oli kiinnitetty kumiseoksesta valmistetut listat, jotka roikkuivat painovoiman vaikutuksesta, vaikka 3D-mallissa kyseiset kumipalat olivat suorassa.

VXinspect- sovelluksesta löytyi työkalu, joka mahdollisti kokonaisien profiilien valitsemisen suoraan 3D-mallista kohdistamiseen. Pick on CAD-työkalulla sai valit- tua höyrylaatikon runkoprofiilin viimeiset näkyvät pinnat sekä laatikon päissä ole- vat kannakeputket kohdistuksen toteuttamiseksi (kuva 10).



KUVIA 10. Höyrylaatikon kohdistamiseen käytetyt pinnat kolmannessa osassa.

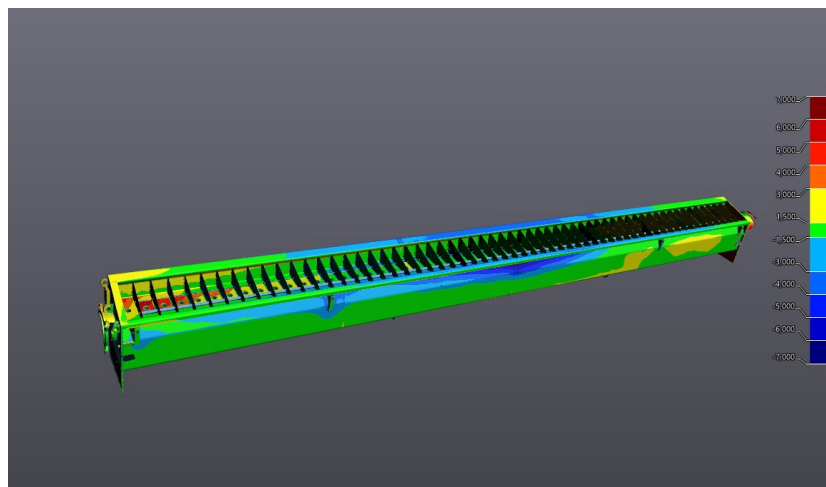
Kun halutut pinnat 3D-mallista oli valittu, VXinspect etsi pistepilvestä vastaavat pinnat ja kohdisti 3D-mallin ja pistepilven niiden mukaan. Tämä kohdistustapa suodatti sovitukselta pois ne pinnat ja profiilit, joita ei haluttu mukaan mahdollis- taen huomattavasti tarkemman sovituksen.

5.6 Tulokset

Mittaustulokset ilmenettiin VXinspect-sovelluksen värikarttatyökalun avulla, joka värittää pistepilven pinnat mittapoikkeaman verrattuna referenssinä käytettyyn 3D-malliin. Käyttäjä voi itse määrittää kartan vaihteluvälit ja niiden värit. Kartan väripalkista voi myös halutessaan tehdä jatkuvan, jolloin värierot ovat häivytettyjä. Muotovertailun tulokset on esitetty kuvina, mutta pienen fonttikoon takia tulokset on lisäksi taulukoitu liitteisiin.

Työssä värikartalle määritettiin viisi värialuetta 1,5 millimetrin välein positiiviseen sekä negatiiviseen suuntaan. Niin sanottuna nolla-alueena pidettiin vihreää, jonka numeerinen väli oli $\pm 1,5$ millimetriä (kuva 11). Toleranssina maksimimittapoikkeamalla oli Valmet Automationin määrittämä ± 3 millimetriä, jota noudatetaan käytössä olevassa luotilankamittauksessa.

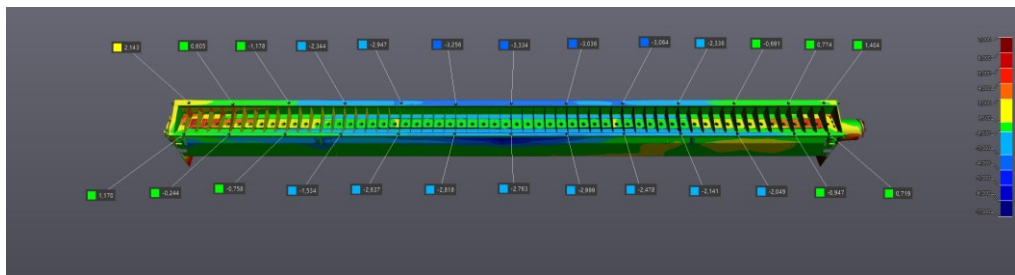
Jotta tuloksista saatiin vertailukelpoisia ja taulukoitavia, määritettiin jokaisessa kolmessa muotovertailussa värikarttaan mittauspiste joka viidennen virtausestolevyn kohdalle runkoprofiilin ylä- ja alapintaan lähelle profiilien tasomaisen pinnan keskikohtaa. Molempiin profiileihin muodostettiin yhteensä kolmetoista mittauspistettä ensimmäisten sijaitessa höyrylaatikon hoitopäässä ensimmäisen virtausestolevyn kohdalla. Virtausestolevyjen määrä ei ollut jaollinen, joten 12. ja 13. mittauspisteen väliin jäi neljä virtausestolevyä viiden sijasta.



KUVA 11. Värikartta ja mittauspoikkeamapalkki.

5.6.1 Ensimmäisen muotovertailun tulokset

Höyrylaatikon ensimmäisessä muotovertailussa tuli esille yläprofiilin suurimmat mittavaihtelut (kuva 12). Höyrylaatikon hoitopään puoleinen yläprofiili oli 2,143 millimetriä ja alapuolen profiili 1,170 millimetriä yläpuolella 3D-mallia vastaavassa kohdassa. Käyttöpäässä yläprofiili oli 1,404 millimetriä yläpuolella ja alaprofiili 0,719 millimetriä yläpuolella 3D-mallin pintaa. Laatikon keskiosa roikkui alaspäin 3D-mallin yläprofiilista -3,334 millimetriä ja -2,763 millimetriä alaprofiilista.

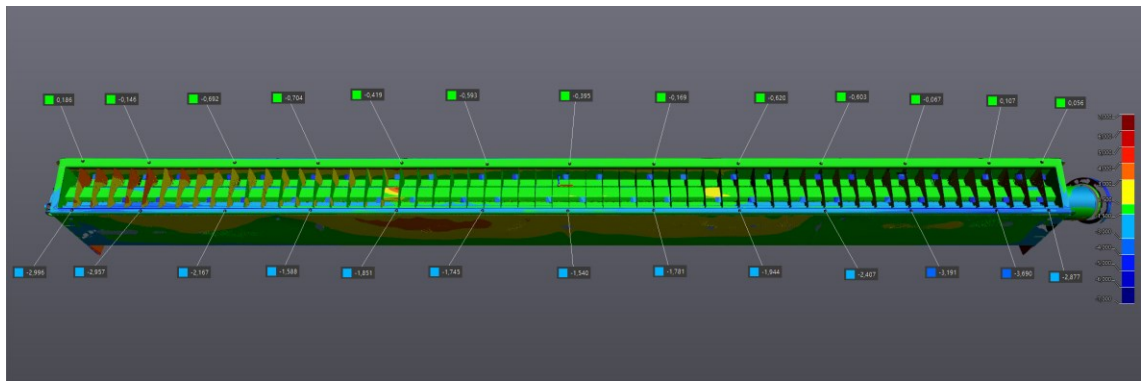


KUVA 12. Muotovertailun värikartta höyrylaatikon ensimmäiselle vaiheelle.

5.6.2 Toisen muotovertailun tulokset

Muotovertailun toisessa (kuva 13) vaiheessa höyrylaatikon ympärille oli hitsattu vuoripellit, jotka peittivät suuren osan höyrylaatikon runko-osuudesta. Laatikko-osuuden nähtävissä olevasta kokonaispinta-alasta enää 20,5 % oli runko-osuutta. Prosenttiosuus oli alhainen tulevan kohdistamisen näkökannalta, sillä jäljelle jäävään 79,5 % pinta-alasta ei voitu pitää oletusarvoisesti suorana.

Ylä- ja alaprofiilin välille muodostui selvä ero etäisyydessä 3D-mallin profiiliin. Yläprofiilin kaikkien pisteiden osuessa $\pm 1,5$ millimetrin toleranssin sisäpuolelle, alapuolen profiilin suurin mittaeroavaisuus oli peräti -3,690 millimetriä. Alaprofiilin kaikki pisteet olivat negatiivisena, joka luo epäilyksen kohdistamisen onnistuneisuudesta. Toisen vaiheen muotovertailussa hyödynnettiinkin kohdistamista pintojen sovittamisen avulla tutkimusmielisesti, jotta saatiin selvitettyä sen toimivuus kappaleissa, jossa pintojen suoruus ei ole oletusarvoista.

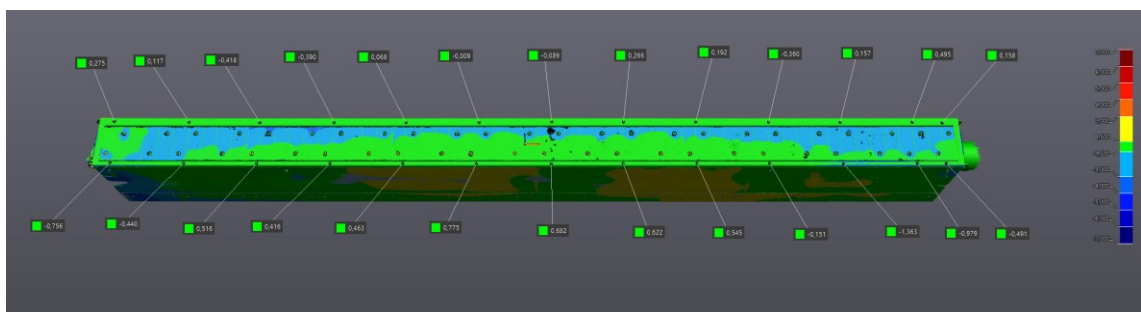


KUVA 13. Muotovertailun värikartta höyrylaatikon toiselle vaiheelle.

5.6.3 Kolmannen muotovertailun tulokset

Muotovertailun kolmannessa vaiheessa päästiin tutkimaan Pick on CAD-työkälyllä toteutetun kohdistamisen tarkkuutta (kuva 14). Kolmannessa muotovertailussa molempien profiilien kaikki 13 mittauspistettä olivat $\pm 1,5$ millimetrin toleranssissa, mikä osoittaa kohdistamisen onnistumisen.

Alaprofiilin 11. mittauspisteessä oli havaittavissa hienoinen ero muihin profiilin pisteisiin. Jos tutkii ensimmäisen ja toisen muotovertailun tuloksia saman pisteen osalta, voidaankin huomioida, että kyseisessä kohdassa höyrylaatikkoa on pieni taipuma negatiiviseen suuntaan.

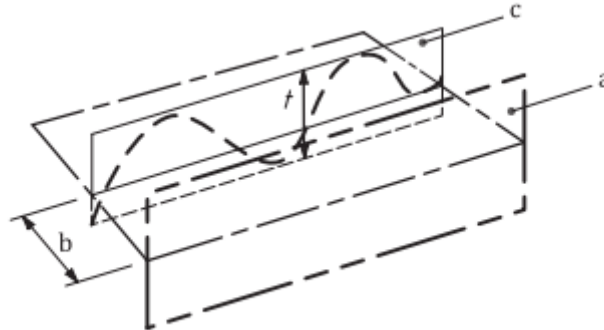


KUVA 14. Muotovertailun värikartta höyrylaatikon kolmannelle vaiheelle.

5.7 Tuloksien suoruus ja tasomaisuus

Valmet Automation on määritellyt yläpinnan profiilin toleranssiksi ± 3 millimetriä suoruudelle ja ± 2 millimetriä kieroudelle yli 8000 millimetrin pituiselle höyrylaatikolle (kuvio 20). Standardi SFS-EN ISO 1101:2017 määrittelee suoruuden (kuvio

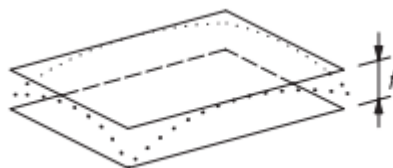
21) mukaan, jossa t on toleranssi, a on peruselementti, b on mikä tahansa kohtisuora etäisyys leikkaustasoon ja c on peruselementin kanssa yhdensuuntainen leikkaustaso.



KUVIO 21. Suoruuden toleranssialueen tulkinta (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2017).

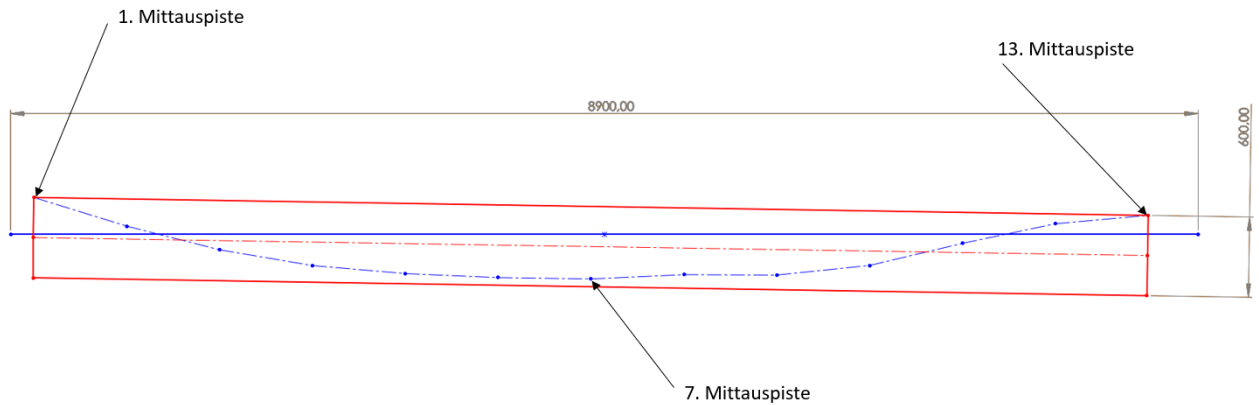
Standardin SFS-EN ISO 1101:2017 mukaisessa suoruustarkastelussa luvussa 5.5 esitetyt mittapoikkeamat muodostavat käyrän, jonka päälle sijoitetaan yhdensuuntainen taso, jonka korkeus on toleranssin mukaisesti kuusi millimetriä. Tämä tarkoittaa sitä, että tason suoruudelle ei määritetä varsinaista nolapistettä mahdollistaen hieman löysemmän mittatarkastelun. Tämän hetkinen luotilankamitus mukailee suoritustavaltaan standardin tulkintaa suoruustoleranssista.

Standardi ei tunne määritelmää kieroudelle, joka on annettu toleranssina mittausvaatimuksessa, mutta tässä voidaan olettaa kierouden tarkoittavan tasomaisuutta. SFS-EN ISO 1101:2017 määrittelee tasomaisuuden toleranssin lähes vastaavalla tavalla suoruuden tapaa. Suoruuden toleranssi koskee vain määriteltyä suuntaa, mutta tasomaisuudessa alueellista elementtiä tarkastellaan sen x - ja y -suunnassa. Tasomaisuudessa toleranssialuetta rajoittaa kaksi yhdensuuntaista tasoa, joiden etäisyys on t (kuvio 22).



KUVIO 22. Tasomaisuuden toleranssialueen tulkinta (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2017).

Kyseisen standardin soveltaminen tässä mittaustutkimuksessa tarkoittaa sitä, että luvussa 5.5 esitellyistä mittaustuloksista muodostetaan kuvaajat, joiden päälle sijoitetaan suorakaide, jonka korkeus on määritetty toleranssi.



KUVIO 23. SFS-EN ISO 1101:2017 mukainen suoruustarkastelu ensimmäiselle muotovertailulle, skaalaus mittapisteille 100:1.

Kuviossa 23 esitellyssä suoruustarkastelussa punainen suorakaide kuvaa kuu- den millimetrin toleranssia suoruudelle. Suorakaiteen keskellä oleva katkoviiva kuvaa toleranssin nollaviivaa, alapuolelle jäävä laatikko negatiivista mittavaihtelua ja yläpuolelle jäävä laatikko positiivista mittavaihtelua. Mittauspisteiden tulokset on skaalattu satakertaiseksi, jotta kuvaajasta ilmenee niiden sijainti. Sininen yhtenäinen 8900 millimetriä pitkä viiva kuvaa höyrylaatikon 3D-mallin yläpinnan tason normaalia ja katkoviiva kuvaa taulukossa 1. esitelyjen mittapoikkeamien etäisyyttä pintaan.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

6.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

Soveltuuko laserkeilaaminen loppumitointitarkasteluun?

Luvussa 3 läpikäydyn laserkeilaamiseen liittyvän teorian ja luvussa 5 esitettyjen muotovertailujen perusteella voidaan todeta, että laserkeilaaminen soveltuu loppumitointitarkasteluun, mikäli pohditaan yksittäin mittaustavan soveltuvuutta. Laserkeilaus on mittausten menetelmänä erittäin tarkka ja soveltuu muotovertailujen osalta hyvin höyrylaatikon yläpinnan profiilin suoruustarkasteluun värikarttojen avulla.

Laserkeilaaminen on moderni mittaustapa, jonka tarkkuus ja kosketukseton mittausten menetelmä voidaan nähdä positiivisina asioina. Keilauksessa on kuitenkin myös heikkoutensa. Höyrylaatikoiden suuret pituudet ja alhaiset mittaustoleranssit aiheuttavat tiukat vaatimukset käytettävälle mittaustarvikkeistolle. Mittaustyöhön soveltuvien laitteistojen hinta nousee todella korkeaksi johtaen merkittävään taloudelliseen investointiin. Työn suorittaminen ei pääty mittaustyöhön, kuten esimerkiksi tämän hetkessä luotilankamittauksessa, vaan mittaustyön jälkeen suurikokoisille pistepilville joutuu suorittamaan muotovertailut todellisten tuloksien selvittämiseksi. Monivaiheinen mittaus vaatii näin ollen myös huomattavasti enemmän aikaa ja ammattitaitoa tarkan työn toteuttamiseksi.

Miten rakenteelliset muodonmuutokset aiheutuvat ja miten niihin voidaan vaikuttaa?

Luvussa 4 esitetty teoria ja suoritettu lujuussimulointi mahdollistavat muodonmuutoksiin liittyvän teorian vertaamisen käytäntöön. Teoriaosuudessa käydään kattavasti läpi hitsauksesta aiheutuvien vääntymien ja jännityksien syntyminen ja niiden välttäminen. Höyrylaatikon lujuussimulointi taas esittää tulokset siitä, kuinka paljon höyrylaatikon tulisi roikkua vastaavassa kannakointitapauksessa ilman hitsaussaumoja.

Ensimmäisen muotovertailun värikartta osoittaa teoriaosuuden paikkansapitävyyden. Höyrylaatikon pitkät hitsaussaumot sen yläosassa aiheuttavat kutistumi-

sellaan laatikolle muodonmuutoksen, joka aiheuttaa yläprofiilille pituussuuntaisen kutistumisen. Kehittämistutkimuksessa tutkittu höyrylaatikko on tapaukseltaan erityisen epäsuotuisa kun tutkitaan yläprofiilin suoruutta. Höyrylaatikossa vaikuttava massan ja putoamiskiihtyvyyden muodostama voima ja hitsauskutistumisen aiheuttama vetojännitys vaikuttavat samalla osa-alueella samaan suuntaan aiheuttaen suuremman muodonmuutoksen. Jos höyrylaatikon pituussuuntaiset hitsausseamat olisivat sijainneet sen alaosassa, olisi hitsausjännityksistä syntyvä vetojännitys kompensoinut massan ja putoamiskiihtyvyyden aiheuttamaa taipumaa höyrylaatikon yläpinnassa.

Höyrylaatikoille suoritettujen toisen ja kolmannen muotovertailun perusteella voidaan todeta, että niiden tämänhetkinen valmistaja tekee todella tarkkaa työtä. Lämmöllä suoristamiseen ei löydy suoranaisesti ohjetta, mitä noudattaa tietyillä teräslaaduilla tai tietynmuotoisilla kappaleilla. Työvaiheen suorittajalta vaaditaan täten kokemuksen tuomaa ammattitaitoa, jotta päästään vastaaviin tuloksiin mitä kolmannessa muotovertailussa on esitetty.

6.2 Työn luotettavuus

Opinnäytetyön tuloksien ja johtopäätösten tulisi olla oikeita, uskottavia ja luotettavia. Työn luotettavuus kuvaakin työn laatua ja sille olisi aina syytä suorittaa tarkastelu kriittisestä näkökulmasta. Tutkimustoiminnassa on kehitetty luotettavuuskäsitteet (validiteetti ja reliabiliteetti), joiden avulla voidaan varmistaa tutkimustöiden tietojen oikeellisuus. Kehittämistutkimuksissa sen luotettavuusarviointiin vaikuttaa myös dokumentaatio, joka mahdollistaa oikeiden valintojen ja niiden hyvyden arviointia. (Kananen 2012, 161.)

Reliabiliteetti tarkoittaa tutkimustulosten pysyvyyttä. Sen perimmäisenä kysymyksenä onkin, että saataisiinko kehittämistutkimuksen tuloksiksi samat lopputulokset, jos tutkimus suoritettaisiin uudestaan. Validiteetilla tarkoitetaan sitä, että onko tutkimuksessa perehdytty oikeisiin asioihin ja ilmiöihin mahdollistaen oikeat johtopäätökset. Nämä mahdollistavat tutkimuksen luotettavuuden ja laadullisen arvioinnin. (Kananen 2012, 168–169.)

Kehittämistutkimuksen laadullisuutta on pyritty parantamaan tarkalla dokumentaatiolla, jossa tutkimustyön suorittamiseen liittyvät valinnat on tuotu esille ja niille on esitetty perustelut. Tämä mahdollistaa sen, että lukija ymmärtää tutkijan ratkaisuja kehittämistutkimuksessa ja kykenee itse arvioimaan valintojen oikeellisuutta ja luotettavuutta. Avoin ja tarkka dokumentaatio mahdollistaa myös työn suorittamisen uudelleen, mikäli tutkimuksen tulokset halutaan kyseenalaistaa.

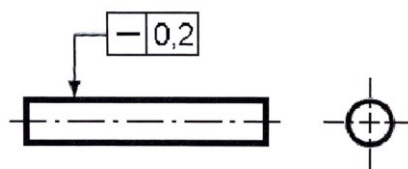
Tutkimuksen validiteettia arvioidessa voidaan pohtia tehtyjä valintoja ja niiden vaihtoehtoisuutta. Kehittämistutkimuksen luotettavuutta lisää validiteetin osalta työn kaksijakoisuus teoreettiseen ja käytännölliseen osa-alueeseen. Tutkimuksen luotettavuutta lisää teoriaosuudessa tehtyjen havaintojen toteutuminen myös käytännössä.

Reliabiliteetin arvioinnissa on otettava huomioon työn luonne ja sen käytännön osuus. Jos kehittämistyö toteutettaisiin samalle höyrylaatikolle eri mittauslaitteistolla, päästäisiinkö samoihin tuloksiin? Jos kehittämistyö toteutettaisiin samalle höyrylaatikolle samalla mittauslaitteistolla, mutta eri mittajilla, päästäisiinkö samoihin tuloksiin?

Kehittämistyön suorituksessa eritoten muotovertailujen toteutustapa on avainasemassa tutkimuksen tuloksille ja niiden tarkkuudelle. Muotovertailujen toisen ja kolmannen vaiheen eroavaisuus tuloksissa osoitti, että kohdistamistavalla on todella suuri vaikutus saatuihin tuloksiin. Tästä voidaankin tehdä johtopäätös, että erilaiset valinnat kohdistamisissa voisivat saada aikaan täysin erilaiset lopputulokset koko kehittämistutkimukselle.

6.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet

Kehittämistutkimuksen pääkysymykseen liittyviä ongelmakohtia nousi esille toleranssien osalta. Valmet Automationin määrittelemän toleranssi suoruudelle ja kieroudelle höyrylaatikon valmistuskuvassa mahdollistavat väärinymmärtämisen. Teknisessä piirtämissä suoruustoleranssi ilmoitetaan kuvion 24 mukaisesti. Tässä merkintätavassa luku 0,2 tarkoittaa toleranssia millimetreissä koko vaihtelulle, \pm -merkillä ilmoitettuna kuvion toleranssi ilmoitettaisiin $\pm 0,1$.



KUVIO 24. Geometrinen suoruustoleranssi teknisessä piirtämisessä (Pere 2009, 92).

Valmistuskuvassa ilmoitettu toleranssi ± 3 millimetriä aiheuttaa hämmennystä kokonaisvaihtelun osalta. Herää kysymys siitä, tarkoitetaanko lukemalla kolmen vai kuuden millimetrin vaihteluväliä. Luvussa 5.2 esitelty mittaustarkastelu on myös tulkinnanvarainen. Suoruuden nollassa voidaan ymmärtää projektiona höyrylaatikon käyttö- ja hoitopään tasalle, tarkoittaen, ettei kuvion 23 mukaista toleranssilaatikon asennon korjausta voitaisi toteuttaa. Tällä tavalla esimerkiksi ensimmäisen vaiheen höyrylaatikko ei olisi ollut vaadittavassa toleranssissa.

Höyrylaatikoiden toleranssien vaatimus olisi myös hyvä kyseenalaistaa ja tutkia tulevaisuudessa tarkemmin. Mitä kyseisellä toleranssilla saavutetaan höyrylaatikon toimivuuden kannalta ja olisiko höyrylaatikon diffuusiolevyihin mahdollista suunnitella säätövarat niin, että laatikon suoruustoleranssi ja tasomaisuus voitaisiin mahdollisesti poistaa. Höyrylaatikon asennustarkkuuteen paperikoneessa voidaan kuitenkin vaikuttaa mahdollisilla säätövaroilla kannakoinnissa varmistuen sen turvallinen liikkuminen käyttö- ja huoltoasennon välillä.

Alakysymykseen liittyvä rakenteellinen tutkimus jäi kehittämistutkimuksen pääkysymykseen verrattuna hieman vajavaisemmaksi. Koska tutkimus keskittyi rakenteeseen ja mahdollisiin muodonmuutoksiin valmistusvaiheessa, tutkimuksessa ei otettu kantaa paineen ja lämpötilan vaikutukseen höyrylaatikossa. Laserkeilauksen hyödyntäminen rakenteellisessa tutkimuksessa kuumalle höyrylaatikolle on muutenkin kyseenalaistettava, sillä valon aallonpituus muuttuu lämpötilan seurauksena aiheuttaen epätarkkuutta mittaukseen tai mahdollisesti jopa sen toimimattomuuden.

7 LÄHTEET

Blom, S. 1975. Hitsaustekniikka 2. Porvoo: WSOY.

Creaform. 2014a. Reverse Engineering of Physical Objects. Viitattu 14.3.2024
https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_6.pdf

Creaform. 2014b. Measurement Technologies in Quality Control Purposes. Viitattu 15.3.2024
https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_quality_en_24032014.pdf

Creaform. 2019a. An Introduction To 3D Scanning. Viitattu 18.3.2024
https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/ebook1_an_introduction_to_3D_scanning.pdf

Creaform. 2019b. Understanding Portable 3D Scanning Technologies. Viitattu 18.3.2024
https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/ebook2_understanding_portable_3D_scanning_technologies.pdf

Eko, T. 2021. Paperikoneen kiertovesijärjestelmän kehittäminen. Tampereen Yliopisto.

Joala, V. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Leica Oy.
<https://docplayer.fi/7209674-Laserkeilauksen-perusteita-ja-mittauksen-suunnittelu.html>

Jokinen, J. 2024. Lead Engineer. Haastattelu. 3.4.2024.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. Jyväskylä: Jyväskylän Ammattikorkeakoulu.

Keinänen, T., Järvinen, M. 2014. Mittaustekniikka. Helsinki: Sanoma Pro.

KnowPap. n.d.a. Massa- ja Vesijärjestelmät. Verkkosivu. Vaatii käyttöoikeuden. Viitattu 3.4.2024.

https://www.knowpap.com/www/suomi/knowpap_system/user_interfaces/know-pap.htm

KnowPap. n.d.b. Paperin ja kartongin valmistus. Verkkosivu. Viitattu 22.3.2024

https://www.knowpap.com/www_demo_version/suomi/paper_technology/paper_machine/general/frame.htm

KnowPap. n.d.c. Puristinratkaisut paino- ja kirjoituspapereille. Verkkosivu. Vaatii käyttöoikeuden. Viitattu 5.4.2024.

https://www.knowpap.com/www/suomi/paper_technology/paper_machine/press_section/4_press_consepts_papers/frame.htm?zoom_highlightsub=puristin

Kukko, A. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Aalto University. https://foto.aalto.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf

Painelaitedirektiivi. 2014/68/EU. Painelaitteiden asettamista saataville markkinoilla koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta, 2014. Direktiivi. Euroopan Unioni. Viitattu 2.4.2024 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014L0068-20140717&from=FI>

Paperikoneet yleistä, 1997. Sepsilva Ltd. Saarijärvi: Gummerus.

Paulapuro, H. 2007. Papermaking part 1, Stock Preparation and Wet End. Jyväskylä: Gummerus.

<https://forestbiofacts.com/papermaking-science-and-technology-books/volume-8-papermaking-part-1/>

Paulapuro, H. 2009. Papermaking part 2, Drying. Jyväskylä: Gummerus.

<https://forestbiofacts.com/papermaking-science-and-technology-books/volume-9-papermaking-part-2/>

Pere, A. 2009. Koneenpiirtustus 1&2. Espoo: Kirpe.

Rautiainen, P. 2009. Papermaking part 3, Finishing. Jyväskylä: Gummerus.
<https://forestbiofacts.com/papermaking-science-and-technology-books/volume-10-papermaking-part-3/>

Salmi, T.& Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus.

SFS-EN ISO 1101: Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Geometriset toleranssit. Muodon, suunnan, sijainnin ja heiton toleranssit, 2017. Standardi. Suomen Standardisoimisliitto. Viitattu 17.3.2024. <https://sfs.fi/>

Valmet. 2023a. Valmet yrityksenä. Verkkosivu. Viitattu 26.3.2024.
<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmet. 2023b. Höyrylaatikon valmistuspiirustus. Käyttö rajoitettu.

Valmet. 2022. Valmet IQ Steam Profiler- Sales presentation. PowerPoint- esitys. Sisäinen dokumentti.

8 LIITTEET

Ensimmäisen muotovertailun mittauspistetulokset ylä- ja alaprofiilille. Taulukon numeeriset arvot millimetrejä.

TAULUKKO 1. Ensimmäisen muotovertailun mittauspistetulokset

Pisteen numero	Tulos, Yläprofiili	Tulos, Alaprofiili	Mittauspisteen etäisyys hoitopään päätylevystä
1.	2,143	1,170	189
2.	0,605	-0,244	789
3.	-1,178	-0,758	1539
4.	-2,344	-1,534	2289
5.	-2,957	-2,637	3039
6.	-3,256	-2,818	3789
7.	-3,334	-2,763	4539
8.	-3,036	-2,999	5289
9.	-3,064	-2,478	6039
10.	-2,336	-2,141	6789
11.	-0,691	-2,049	7539
12.	0,744	-0,947	8289
13.	1,404	0,719	8889

Toisen muotovertailun mittauspistetulokset ylä- ja alaprofiilille. Taulukon numeeriset arvot millimetrejä.

TAULUKKO 2. Toisen muotovertailun mittauspistetulokset

Pisteen numero	Tulos, Yläprofiili	Tulos, Alaprofiili	Mittauspisteen etäisyys hoitopään päätylevystä
1.	0,186	-2,996	189
2.	-0,146	-2,957	789
3.	-0,692	-2,167	1539
4.	-0,704	-1,588	2289
5.	-0,419	-1,851	3039
6.	-0,593	-1,745	3789
7.	-0,395	-1,540	4539
8.	-0,169	-1,781	5289
9.	-0,620	-1,944	6039
10.	-0,603	-2,407	6789
11.	-0,067	-3,191	7539
12.	0,107	-3,690	8289
13.	0,056	-2,877	8889

Kolmannen muotovertailun mittauspistetulokset ylä- ja alaprofiilille. Taulukon numeeriset arvot millimetrejä.

TAULUKKO 3. Kolmannen muotovertailun mittauspistetulokset

Pisteen numero	Tulos, Yläprofiili	Tulos, Alaprofiili	Mittauspisteen etäisyys hoitopään päätylevystä
1.	0,275	-0,756	189
2.	0,117	-0,440	789
3.	-0,418	0,516	1539
4.	-0,390	0,416	2289
5.	0,068	0,463	3039
6.	-0,009	0,775	3789
7.	-0,089	0,682	4539
8.	0,266	0,622	5289
9.	0,192	0,545	6039
10.	-0,360	-0,151	6789
11.	0,157	-1,363	7539
12.	0,495	-0,979	8289
13.	0,158	-0,491	8889