

# **Pitkänomaisen kappaleen valmistustarkkuuden parantaminen**

Jani Nuolikoski

Opinnäytetyö  
Helmikuu 2020  
Tekniikan ala  
Insinööri (AMK), konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Tuotekehitys

Tekijä(t) Nuolikoski, Jani	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Helmikuu 2020
	Sivumäärä 89	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Pitkänomaisen kappaleen valmistustarkkuuden parantaminen</b>		
Tutkinto-ohjelma Konetekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Harri Peuranen & Miikka Parviainen		
Toimeksiantaja(t) Yritys X		
Tiivistelmä <p>Yrityksessä X havaittiin pitkänomaisessa kappaleessa toistuvasti tasomaisuustoleranssin ylityksiä. Toleranssiylitykset vaikuttivat kappaleen ominaisuuksiin, mikä johti korjaaviin toimenpiteisiin. Korjaavat toimenpiteet aiheuttivat lisäkustannuksia, joten toleranssiylityksien syyt haluttiin selvittää. Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää todennäköisimmät syyt toleranssiylityksien syntymiselle ja listata niiden syntymiseen vaikuttavat tekijät eri valmistusvaiheista.</p> <p>Opinnäytetyö aloitettiin tutustumalla kappaleen valmistuksen eri vaiheisiin ja keräämällä alustava tietoperusta. Tietoperustan avulla valmistusvaiheista haettiin syy-seuraussuhteita, jotka toimivat pohjana teemahaastatteluille. Tutkimuksen laadullisessa osuudessa tehtiin teemahaastattelut eri valmistusvaiheiden työntekijöille sekä ulkopuolisille asiantuntijoille. Haastattelujen pohjalta syy-seuraussuhteita vahvistettiin ja muodostettiin teoria toleranssiylitysten synnystä. Teorian tueksi kerättiin ja analysoitiin mittaustuloksia määrällisen tutkimuksen menetelmillä.</p> <p>Todennäköisimmiksi syiksi toleranssiylityksien syntymiseen saatiin kappaleiden vaurioituminen kuljetuksessa ja pintakäsittelyvaiheen aikana tapahtuvat muodonmuutokset. Toleranssiylityksien syntymiseen vaikuttaneiksi tekijöiksi saatiin lämpötilaeroista johtuvat muodonmuutokset koneistuksen aikana, hitsausvaiheessa syntyvät jäännösjännitykset sekä muut ennen koneistusta syntyneet jäännösjännitykset.</p> <p>Tasomaisuustoleranssivaatimus oli kappaleen kokoon nähden huomattavan suuri, mikä teki tutkimustyöstä haasteellisen. Kappaleen valmistusvaiheiden jakautuminen useille eri alihankkijoille vaikutti tutkimuksessa käytettyihin menetelmiin ja sen toteuttamiseen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Tasomaisuustoleranssi, valmistustarkkuus, suoruuden mitta		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Nuolikoski, Jani	Type of publication Bachelor's thesis	Date February 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 89	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Improving manufacturing accuracy of elongated parts</b>		
Degree programme Degree Programme in Mechanical Engineering		
Supervisor(s) Peuranen, Harri & Parviainen, Miikka		
Assigned by Company X		
Abstract  <p>Company X repeatedly observed deviations from the flatness tolerance in an elongated metal part that the company manufactures. Exceeding the tolerance affected the properties of the part, leading to corrective actions, which caused additional costs. Therefore, the reasons for the deviations needed to be determined. The aim of the thesis was to find the most likely causes for exceeding the tolerance, and to list the factors responsible for their occurrence in different manufacturing phases.</p> <p>The thesis started by exploring the different phases of part manufacturing and gathering a preliminary knowledge base. Based on this, causal relationships were sought in the manufacturing phases, and the theme interviews were conducted accordingly. In the qualitative part of the study, employees at various phases of production as well as external experts were interviewed. The interviews strengthened the cause-effect relationships and a theory on exceeding the tolerance limits emerged. To support the theory, measurement results were collected and analyzed using quantitative research methods.</p> <p>The most likely causes of exceeding the tolerance were damage to the parts during transport and deformation during the surface treatment phase. Factors contributing to the development of deviations from the tolerance included deformations due to temperature differences during machining, residual stresses in the welding phase, and other residual stresses occurring prior to machining.</p> <p>The tolerance zone was small considering the size of the part, which made the study challenging. The distribution of the manufacturing phases of the part to several subcontractors influenced the methods used in the study and its implementation.</p>		
Keywords/tags (subjects) Flatness tolerance, manufacturing accuracy, straightness measurement		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto.....</b>	<b>6</b>
1.1	Opinnäytetyön aihe.....	6
1.2	Opinnäytetyön rajaukset ja tavoitteet.....	6
1.3	Pitkänomainen kappale.....	7
1.3.1	Kappaleen rakenne.....	7
1.3.2	Valmistusprosessi.....	9
1.3.3	Toleranssiylitys.....	9
<b>2</b>	<b>Tutkimusmenetelmät.....</b>	<b>11</b>
2.1	Tutkimusote.....	11
2.2	Aineistonkeruumenetelmät.....	12
2.3	Teemahaastatteluaineiston analyysimenetelmä.....	15
2.4	Tilastollisen aineiston analyysimenetelmät.....	17
<b>3</b>	<b>Valmistuksen päävaiheet.....</b>	<b>18</b>
3.1	Hitsaus.....	19
3.1.1	MAG-hitsaus.....	19
3.1.2	Silloitushitsaus.....	20
3.1.3	Teräsrakenteiden sisäiset jännitykset.....	20
3.1.4	Hitsausjännitykset.....	21
3.1.5	Muodonmuutosten vähentäminen.....	24
3.2	Jännitystenpoistohehkutus.....	25
3.3	Koneistus.....	27
3.3.1	Jyrsintä.....	27
3.3.2	Lastuamislämpö.....	28
3.3.3	Kappaleen kiinnittäminen.....	28
3.4	Mittaus.....	29
3.4.1	Mittausvirheet.....	29
3.4.2	Virhelähteet.....	30
3.4.3	Mittausepävarmuus.....	31
3.4.4	Suoruuden mittaus laserinterferometrillä.....	32

	2
3.4.5 Virheen eliminointi 180°:n käännöllä .....	35
3.5 FEM-analyysi.....	35
3.5.1 Umpinainen malli.....	36
3.5.2 Kuorimalli.....	37
<b>4 Työn toteutus .....</b>	<b>38</b>
4.1 Alihankkijan haastattelu: Hitsaus .....	38
4.2 Alihankkijan haastattelu: Jännitystenpoistohehkutuksen .....	41
4.3 Alihankkijan haastattelu: Koneistus .....	42
4.4 Pintakäsittely ja mittaus kokoonpanossa .....	46
4.5 Ulkopuolisten asiantuntijoiden haastattelut .....	50
4.5.1 Asiantuntija 1.....	50
4.5.2 Asiantuntija 2.....	51
4.6 Mittaustulosten keräys ja analysointi .....	52
4.6.1 Hitsaus .....	53
4.6.2 Koneistus .....	55
4.6.3 Mittaaminen kokoonpanossa.....	56
4.7 Analyysit elementtimenetelmällä .....	62
4.7.1 Valmistelut.....	63
4.7.2 Kappaleen noston analyysi .....	64
4.7.3 Kuljetuksen analyysi .....	67
<b>5 Työn tulokset ja kehitysehdotukset .....</b>	<b>70</b>
<b>6 Pohdinta.....</b>	<b>73</b>
<b>Lähteet.....</b>	<b>75</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>77</b>
Liite 1. Teemahaastattelun runko: hitsaus.....	77
Liite 2. Teemahaastattelun runko: jännitystenpoistohehkutus.....	78
Liite 3. Teemahaastattelun runko: koneistus.....	79
Liite 4. Teemahaastattelun runko: suoruuden mittaus laserinterferometrillä ....	80
Liite 5. Alustavat syy-seuraussuhteet: hitsaus .....	81
Liite 6. Alustavat syy-seuraussuhteet: jännitystenpoistohehkutus .....	82

Liite 7. Alustavat syy-seuraussuhteet: koneistus .....	83
Liite 8. Alustavat syy-seuraussuhteet: suoruuden mittaus laserinterferometrillä.....	84
Liite 9. Työstökoneen suoruusvirheen eliminointi kappaleen mittauksessa .....	85
Liite 10. Täydennetyt syy-seuraussuhteet: hitsaus .....	86
Liite 11. Täydennetyt syy-seuraussuhteet: jännitystenpoistohehkusutus .....	87
Liite 12. Täydennetyt syy-seuraussuhteet: koneistus .....	88
Liite 13. Täydennetyt syy-seuraussuhteet: suoruuden mittaus laserinterferometrillä.....	89

## Kuviot

Kuvio 1. Tutkitun kappaleen 3D-kuva. Mittayksikkö on mm. ....	8
Kuvio 2. Tyypilliset muotovirhetapaukset suoruumittauksissa XY-tasossa.....	10
Kuvio 3. Kappaleen tasomaisuustoleranssi, yksinkertaistettu esitys.....	10
Kuvio 4. Esimerkki syy-seurauskaaviosta (Peuranen 2019, 10). ....	16
Kuvio 5. Esimerkki hajontakuvaajasta (Kume 1998, 73). ....	17
Kuvio 6. Esimerkki regressioanalyysistä (Kume 1998, 85). ....	18
Kuvio 7. Pitkittäissuuntaisen hitsausjännityksen syntyminen (Niemi & Kemppe 1993, 169).....	22
Kuvio 8. Pitkittäissuuntaisten jännitysten aiheuttama poikittäissuuntaiset jännitykset (Niemi & Kemppe 1993, 170) .....	23
Kuvio 9. Poikittaisten jännityksien syntyminen, kun kutistuminen on estetty (Niemi & Kemppe 1993, 170) .....	24
Kuvio 10. Lämpökäsittelyjen alueet teräksille (Kivivuori & Härkönen 2009, 37).....	26
Kuvio 11. Lastuamislämmön jakautuminen prosentteina (Grzesik 2008, 128) .....	28
Kuvio 12. Laserinterferometrin toimintaperiaate (Andersson & Tikka 1997, 197) .....	32
Kuvio 13. Kulmamittaus laserinterferometrillä (Chapman, Fergusson-Kelly, Holloway, Lock, Lee 2016, 2) .....	33
Kuvio 14. Suoruuuden mittauksen periaate (Andersson & Tikka 1997, 209) .....	34
Kuvio 15. Esimerkkejä umpinaiisiin malleihin käytetyistä elementeistä (Huei-Huang 2018, 38).....	37
Kuvio 16. Esimerkkejä kuorimalleihin käytettävistä elementeistä (Huei-Huang 2018, 38).....	38
Kuvio 17. Askelhitsauksen tyyppejä (Lepola & Ylikangas 2016, 352).....	40
Kuvio 18. Hitsauksen mittauspöytäkirjan periaatekuvio .....	40
Kuvio 19. Kappaleen asettelu uunissa käsittelyaikana.....	42
Kuvio 20. Osan kiinnitys kuljetusalustaan ennen koneistusta .....	43
Kuvio 21. Johdekelkkojen kulkulinjan suoruuuden mittaus.....	47
Kuvio 22. Laserinterferometrin olosuhdeanturi .....	48
Kuvio 23. Kappaleeseen kiinnitetty lämpötila-anturi.....	49
Kuvio 24. Hitsauksen jälkeisen suoruuuden ja suurimman kokoonpanossa mitatun suoruuusvirheen hajontakuvio.....	54

Kuvio 25. Suurimman suoruusvirheen ja hitsaajan välinen regressioanalyysi .....	55
Kuvio 26. Koneistuksessa laadittu mittauspöytäkirja .....	56
Kuvio 27. Suurimman suoruusvirheen ja ulkolämpötilan hajontakuvaaja .....	57
Kuvio 28. Suoruuksikäyrien erilaiset muodot .....	58
Kuvio 29. Suoruuksikäyrän muodon ja suurimman suoruusvirheen regressioanalyysi .	59
Kuvio 30. Kappaleen 10 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn.....	60
Kuvio 31. Kappaleen 20 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn.....	60
Kuvio 32. Kappaleen 30 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn.....	61
Kuvio 33. Kappaleen 40 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn.....	61
Kuvio 34. Kuorimalli Autodesk Inventorissa.....	63
Kuvio 35. Laskentamallin elementtiverkotus .....	64
Kuvio 36. Nostoanalyysin reunaehdot .....	65
Kuvio 37. Jännitykset nostossa.....	65
Kuvio 38. Jännityskeskittymä nostossa .....	66
Kuvio 39. Noston aiheuttama muodonmuutos kappaleessa Z-akselin suunnassa.....	66
Kuvio 40. Kuljetusanalyysin reunaehdot.....	68
Kuvio 41. Jännitykset kuljetuksessa .....	68
Kuvio 42. Jännityskeskittymät kuljetuksessa .....	69
Kuvio 43. Maksimi siirtymä kuljetuksessa .....	69

## Taulukot

Taulukko 1. Suoruuden mittauksen mittausepävarmuudet eri laitteilla (Esala, Lehto, & Tikka 2003, 39).....	35
---	----



# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön aihe

Yritys X valmistaa laitteita, joissa tarvitaan tarkkamittaisia osia. Eräs näistä osista on pitkänomainen palkkimainen kappale. Tältä pitkänomaiselta kappaleelta vaaditaan muotonsa lisäksi keveyttä ja suurta mittatarkkuutta. Jotta yritys pystyisi myymään laitteitaan kilpailukykyiseen hintaan osien valmistuksen tulisi olla mahdollisimman kustannustehokasta. Koska opinnäytetyössä on kyse yrityksen liiketoiminnalle merkittävistä tiedoista, ei yrityksen nimeä eikä kappaleen käyttötarkoitusta kerrota tässä raportissa.

Kyseisessä kappaleessa erityistä tarkkuutta vaaditaan erään komponentin asennuspinnalta, joten sen tasomaisuudelle on määritetty tarkka toleranssi. Tämän asennuspinnan muotovirheet vaikuttavat oleellisesti laitteen ominaisuuksiin, joten toleranssin toteutuminen on varmistettava kokoonpanovaiheessa jokaisesta kappaleesta erikseen.

Ennen opinnäytetyön aloittamista toleranssiylityksiä havaittiin huomattavan paljon tietyn ajanjakson aikana valmistetuissa kappaleissa. Toleranssiylitykset vaativat aina korjaavia toimenpiteitä, ja ylimääräiset työvaiheet taas aiheuttavat lisää kustannuksia. Tämän opinnäytetyön tehtävänä oli tuon pitkänomaisen kappaleen valmistustarkkuuden parantaminen

## 1.2 Opinnäytetyön rajaukset ja tavoitteet

Opinnäytetyössä tutkitusta pitkänomaisesta kappaleesta oli erimittaisia malleja. Näiden eri mallien välillä osan rakenteet ja materiaalivahvuudet eroavat toisistaan, minkä takia työ rajattiin vain yhteen tiettyyn malliin ja osanumeroon. Näin työssä voitiin keskittyä tarkemmin valmistuksen eri vaiheisiin ja yksityiskohtiin kuin tutkittaessa useampaa erilaista kappaletta. Rajauksen perusteena oli myös toleranssiylityksien

määrä, niitä oli selkeästi eniten työhön valitussa mallissa. Työssä tutkitussa kappaleessa on useita valmistustoleransseja. Tämä työ rajattiin koskemaan vain yhtä tiettyä tasomaisuustoleranssia, jonka toteutuminen on koneen ominaisuuksien takia oleellista ja jossa aiemmin mainitut useat ylitykset ovat tapahtuneet. Kyseinen tasomaisuustoleranssin suuruus ja sijainti esitetään tarkemmin luvussa 1.3.3.

Työn tavoitteena oli löytää todennäköisimmät syyt toleranssiylityksien syntymiseen. Tavoitteena oli myös selvittää ja listata toleranssiylityksen syntymiseen vaikuttavat tekijät valmistuksen eri vaiheista. Konkreettisenä tulostavoitteena oli saada lista erilaisista korjaavista toimenpiteistä. Tavoitteena ei ollut kokeilla eri ratkaisuja käytännössä tai seurata niiden toimivuutta. Näiden tavoitteiden pohjalta muodostettiin seuraavat tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset:

Tutkimusongelma: Pitkänomaisen kappaleen tasomaisuustoleranssin ylittyminen.

Tutkimuskysymys 1: Mitkä tekijät aiheuttavat muotovirheen syntymistä?

Tutkimuskysymys 2: Kuinka tasomaisuustoleranssin ylityksiä voitaisiin vähentää?

Tasomaisuudella viitataan rajauksessa mainittuun tiettyyn tasomaisuustoleranssiin. Muotovirheellä tarkoitetaan tasomaisuustoleranssin alaisen pinnan muodon tasomaisuudesta poikkeamista.

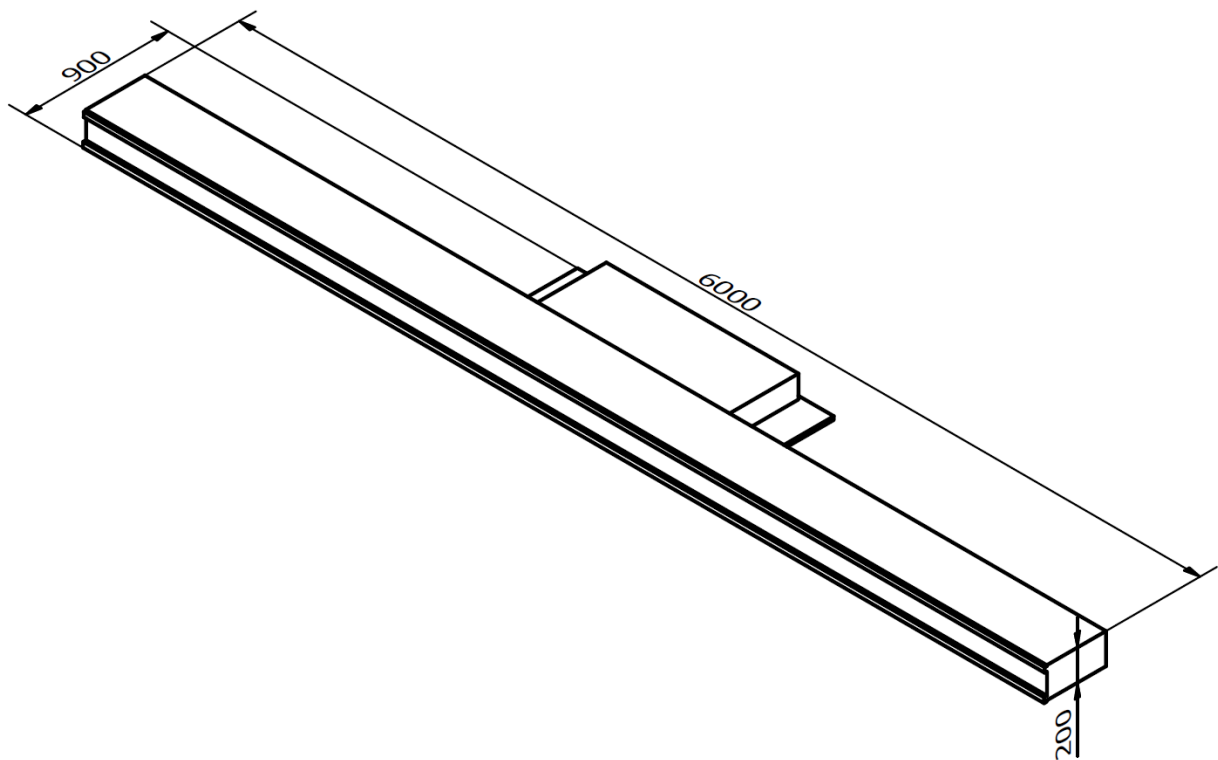
## 1.3 Pitkänomainen kappale

### 1.3.1 Kappaleen rakenne

Työssä tutkitun kappaleen tulisi olla kevyt, jäykkä ja samalla mittatarkka. Tämä johtaa kompromissiin eri ominaisuuksien välillä. Rakennetta kevennettäessä rakenteen jäykkyys ja ominaistaajuus laskevat. Tähän vaikuttaa oleellisesti mistä materiaalia poistetaan. Hyvällä suunnittelulla ja optimoinnilla rakenteen keventäminen vaikuttaa mahdollisimman vähän kappaleen jäykkyyteen. Nykyaikaisilla laskentaohjelmistoilla optimoiminen on hyvinkin helppoa. Rakenteen optimoinnissa on kuitenkin huomioitava

valmistustekniset asiat, jotka antavat reunaehdot lopputulokselle. Laskennan näkökulmasta optimaalisin rakenne olisi todennäköisesti mahdoton tai ainakin erittäin kallis valmistaa.

Kyseisessä kappaleessa rakenteen keveyttä on haettu ohuesta materiaalista valmistetulla, kahdesta taivutetusta levystä muodostuvalla palkkimaisella rakenteella, jolloin materiaali on sijoitettu ulkoreunoille. Palkin sisälle on sijoitettu ohutlevystä valmistettuja vinossa olevia tukiripoja jäykistämään rakennetta. Aiemmin mainittujen levyjen vahvuus on 3 mm. Palkin yhdelle sivulle kiinnittyvät paksummasta materiaalista valmistetut levyt jäykistävät rakennetta ja toimivat kiinnityspintana kappaleeseen kiinnitettäville komponenteille. Palkkikokonaisuus kiinnittyy selkeästi paksumpaan, 20 mm vahvaan levyyn, joka toimii vahvikkeena ja tukevana kiinnityspintana, josta valmis kappale kiinnitetään isompaan kokonaisuuteen. Kappaleen ääriimitat ovat noin 6000 x 900 x 200 mm. Kappale on esitetty yksinkertaistettuna kuviossa 1 mittojen kanssa.



Kuvio 1. Tutkitun kappaleen 3D-kuva. Mittayksikkö on mm.

### 1.3.2 Valmistusprosessi

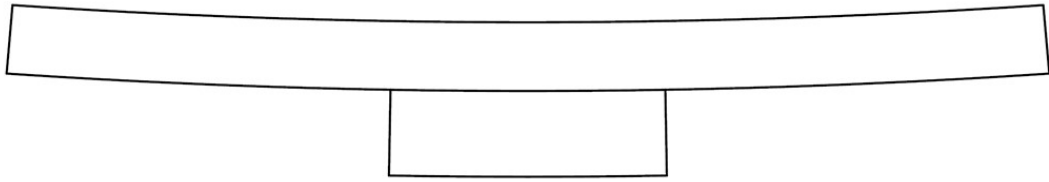
Kappaleen valmistaminen alkaa levyaihioiden leikkauksella, taivutuksella ja hitsaamisella. Palkkimainen kappale muodostuu useista levystä, jotka liitetään toisiinsa hitsaamalla. Tämän jälkeen kokoon hitsatulle kappaleelle tehdään jännityksenpoistoherkutus. Herkutuksen jälkeen kappale pohjamaalataan ja siihen tehdään tarvittavat koneistukset. Koneistuksen jälkeen kappale pintakäsitellään. Pintakäsittelyn jälkeen kappaleelle tehdään tarvittavat tarkistusmittaukset ennen kokoonpanon alkamista. Kappaleessa käytettävien levyjen materiaali on rakenneteräs S355. Valmistusprosessin eri vaiheet käsitellään tarkemmin luvussa 3.

### 1.3.3 Toleranssiylitys

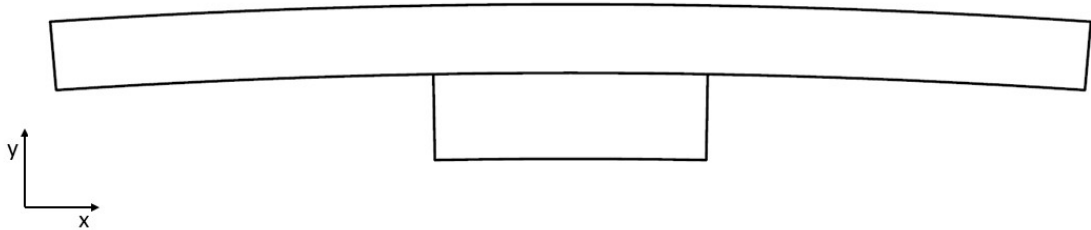
Työ rajattiin vain tietyssä tasomaisuustoleranssissa ilmeneviin toleranssiylityksiin. Tasomaisuustoleranssi on osoitettu tietylle pinnalle, johon myöhemmin kokoonpanovaiheessa asennetaan tarkkaa asennuspintaa vaativa lineaarijohde. Tasomaisuustoleranssilla pyritään saamaan asennetussa johteessa liikkuvan johdekellon kulkureitti mahdollisimman suoraksi.

Mittaamisessa hyödynnetään kappaleeseen asennetulle johteelle asennettuja johdekelloja, joiden kulkureitin suoruus mitataan kahdessa eri tasossa, tässä tapauksessa XY- ja XZ-tasossa. Suoruuden mittaaminen on huomattavasti nopeampaa kuin tasomaisuuden mittaaminen. Lopullinen suoruus muodostuu lineaarijohteen asennustarkkuudesta, lineaarijohteen valmistustarkkuudesta ja kappaleen asennuspinnan valmistustarkkuudesta. Mittaamalla kulkulinjan suoruutta kappaleeseen asennetusta lineaarijohteesta mittaustuloksesta ilmenee lopullinen kulkulinjan suoruus, joka on oleellinen tieto kappaleen ominaisuuksien kannalta. Mittauksissa ilmeneviä XY-tason tyypillisiä suoruusvirheitä havainnollistetaan kuviossa 2.

Tapaus A:

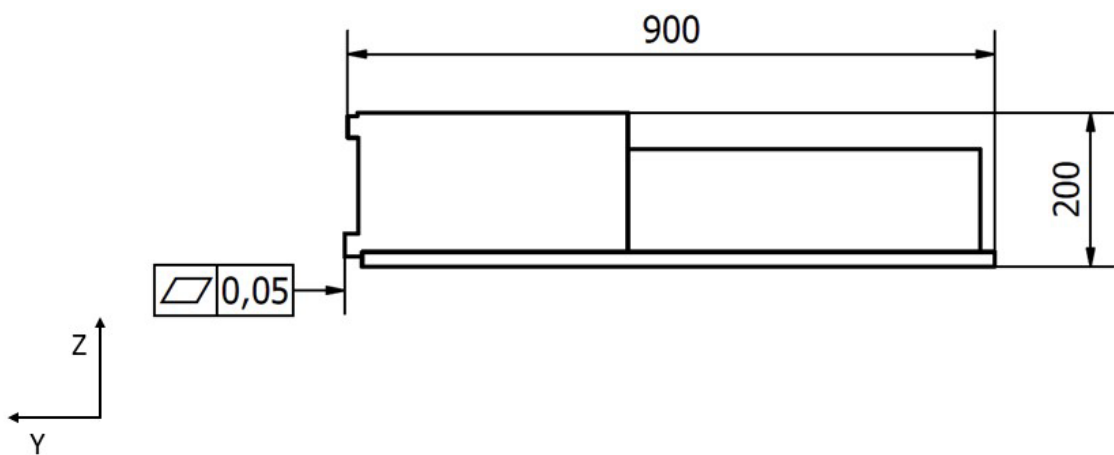


Tapaus B:



Kuvio 2. Tyypilliset muotovirhetapaukset suoruusmittauksissa XY-tasossa

Työssä tutkitun tasomaisuustoleranssin tasomaisuusvaatimus on 0,05 mm kuviossa 3 esitetylle pinnalle. Toleranssin osoittama pinta ulottuu koko palkin matkalle, jonka pituus on noin 6000 mm.



Kuvio 3. Kappaleen tasomaisuustoleranssi, yksinkertaistettu esitys

Tätä tasomaisuustoleranssin vaatimusta sovelletaan suoruuden mittaamisessa XY-tasossa, jolloin suurin virhe suoruudessa saa olla 0,05 mm. Tämä ei aiheuta valmistukselle piirustuksessa esitettyä tasomaisuustoleranssia suurempaa vaatimusta, koska suoruuden ylittyminen tasomaisuustoleranssia kohtisuorassa olevassa tasossa tarkoittaa myös tasomaisuuden ylittymistä.

XZ-tasossa mitatulle suoruudelle sallitaan suurempi virhe kappaleen käyttötarkoituksesta tulevien vaatimuksien puolesta. XZ-tason suoruutta ei enää myöhemmin käsitellä työssä, koska sillä ei ole suurta merkitystä kappaleen ominaisuuksien kannalta.

## 2 Tutkimusmenetelmät

### 2.1 Tutkimusote

Tutkimusongelma ratkaistaan eri tutkimusmenetelmillä. Tutkimusongelman laajaa lähestymistapaa kutsutaan tutkimusotteeksi. Tutkimusotteita on kvalitatiivinen tutkimusote ja kvantitatiivinen tutkimusote. Näistä kumpikin soveltuu tietynlaiseen työhön, joten valinta tehdään kyseisen tutkimuksen mukaisesti. (Kananen 2013, 22-23.) Tässä opinnäytetyössä käytettiin kvalitatiivista ja kvantitatiivista tutkimusotetta.

#### **Kvalitatiivinen tutkimusote**

Kvalitatiivinen eli laadullinen tutkimusote tarkoittaa tutkimusta, jossa aineistoa kerätään ilman tilastollisia menetelmiä. Kvalitatiivinen tutkimusmenetelmä soveltuu sitä paremmin työhön mitä vähemmän aiheesta tiedetään. Tavoitteena on ymmärtää, kuvata ja antaa mielekäs tulkinta tutkittavasta ilmiöstä. Kvalitatiivinen tutkimus tuottaa teorian käytännöstä, jolloin otetta voidaan kutsua myös induktioksi. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa ei ole yhtä tiukkoja sääntöjä kuin kvantitatiivisessa tutkimuksessa, jolloin tutkimuksen aikana voidaan joustavasti liikkua eri vaiheiden välillä ja tehdä esimerkiksi teoriapohdintaa ja kenttätöitä vuorotellen tutkimustuloksien sitä vaatiessa. Kvalitatiivisen tutkimuksen tulos ei ole yksi selkeä ”vastaus” vaan tutkijasta riippuva tulkinta. Kvalitatiivinen tutkimus nähdäänkin yleensä esitutkimuksena, jonka jälkeen

varsinainen tutkimus suoritetaan käyttäen kvantitatiivista tutkimusotetta. (Kananen 2012, 29-30.) Kvantitatiivinen tutkimus perustuu kvalitatiiviseen tutkimukseen, jota pidetäänkin tutkimustoiminnan perustana (Kananen 2013, 26)

### **Kvantitatiivinen tutkimusote**

Kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus koostuu pääosin eri tekijöiden eli muuttujien määrällisestä mittaamisesta, mittausten perusteella tehdyistä vuorovaikutusten suhteiden laskemisesta ja vertailusta sekä muuttujien laskemisesta. Tutkitaan kerätyn datan avulla, miten paljon mikäkin vaikuttaa mihinkin. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa ilmiö tunnetaan teorian kautta. Kvantitatiivista tutkimusta edeltääkin aina kvalitatiivinen tutkimus, koska sillä muodostetaan kvantitatiiviseen tutkimukseen tarvittava teoria. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että mittaamista ei voida suorittaa, jos ei tiedetä mitä tulee mitata ja miksi. Kvalitatiivista tutkimusta ei tarvitse tehdä itse, jos saatavilla on aiemmin suoritettu tutkimus, jonka avulla luotu teoria tai malli soveltuu pohjaksi omalle kvantitatiiviselle tutkimukselle. Kvantitatiivinen tutkimus etenee kvalitatiivisesta poiketen suoraviivaisesti ja yhteen suuntaan aina vaiheesta seuraavaan. Tutkimuksen onnistumisen takia onkin tärkeää, että tutkimusasetelma on hyvä. (Kananen 2011, 12-19.)

### **Tutkimusotteen valinta**

Opinnäytetyössä perehdyttiin toleranssiylityksiä aiheuttaviin tekijöihin useiden eri tietolähteiden kautta, johon kvalitatiivisen eli laadulliset menetelmät soveltuivat paremmin. Kvalitatiivisen tutkimuksen mukaisesti ilmiöstä muodostettiin teoria. Teoriaa päätettiin vahvistaa kvantitatiivisen eli määrällisen tutkimuksen menetelmillä. Kvalitatiivisella tutkimuksella muodostettua teoriaa hyödyntäen kerättiin ja analysoitiin aineistoa valmistusprosessista kvantitatiivisen tutkimuksen menetelmillä. Kvantitatiivisen tutkimuksen tuloksien perusteella teoriaa täydennettiin ja tarvittaessa korjattiin. Täydennetyt teorian pohjalta vastattiin tutkimuskysymyksiin.

## **2.2 Aineistonkeruumenetelmät**

Opinnäytetyössä käytetyt aineistonkeruumenetelmät olivat teemahaastattelu ja havainnointi. Teemahaastattelut muodostavat valtaosan laadullisessa tutkimuksessa

käytetystä aineistosta. Havainnointia käytettiin teemahaastattelujen aikana tapahtuneiden työsuoritteiden seurannassa, jolloin ne täydensivät haastatteluista saatua aineistoa. Määrällisen tutkimuksen aineiston keräämiseen ei tarvittu erillistä aineistonkeruumenetelmää, koska työssä käytettiin eri osapuolien valmiiksi keräämää aineistoa.

### **Teemahaastattelu**

Teemahaastattelu eroaa perinteisestä haastattelusta tai kyselystä sillä, että siinä käytetään tarkkojen kysymyksien lisäksi teemoja. Teemat ovat ikään kuin laajoja kysymyksiä tai aihealueita, joilla pyritään keskusteluun ja sen kautta pitkiin vastauksiin. Teemahaastatteluissa on tarkoitus syntyä uusia keskustelupolkuja, jolloin saadaan kattavampi vastaus kuin tarkasti kohdistetuilla kysymyksillä. Menetelmällä halutaankin kasvattaa ymmärrystä tutkimusongelman ilmiöstä. Teemahaastattelun käyttö on perusteltua silloin, kun tutkittavaa ilmiötä ei kovinkaan hyvin tunneta. (Kananen 2013, 93-94.)

Teemahaastattelut voidaan suorittaa yksilöhaastattelun lisäksi myös ryhmähaastatteluna. Haastateltaviksi valitaan ensisijaisesti henkilöt, joita tutkittava ilmiö koskettaa. Jos tämän ei ole mahdollista niin haastatellaan henkilöitä, jotka eniten ilmiöstä tietävät. Teemahaastattelussa pyritään mahdollisuuksien mukaan haastattelemaan niin useita henkilöitä, että tulokset saturoituvat eli alkavat toistamaan itseään. Haastatteluista saatua tietoa on siis analysoitava koko ajan, että tiedetään, milloin sitä on riittävästi. (Kananen 2013, 94-95.)

Haastattelut on saatava talteen, jotta ne voidaan dokumentoida ja niitä voitaisiin myöhemmin analysoida. Vastaukset voidaan joko kirjata haastattelun edetessä tai sitten käyttää digitaalista tallennusmenetelmää. Digitaalinen ääninauhuri on paras tapa haastattelujen tallentamiseen, jolloin tutkijan ei tarvitse keskittyä vastausten kirjaamiseen. Nauhoitteisiin pystyy palaamaan myöhemmin ja ne säilyttävät tauot ja äänenpaineeet, jotka kiireellä kirjoitetusta tekstistä puuttuisivat. Tallenteet on myöhemmin kirjoitettava kirjalliseen muotoon eli litteroitava, jonka jälkeen niitä on vasta mahdollista analysoida. (Kananen 2013, 96-98.)



### **Havainnointi**

Havainnoinnissa tutkija kerää tutkittavasta kohteesta tietoa nimensä mukaisesti havainnoimalla. Havainnoinnin käyttö on suositeltavaa silloin, kun muilla keinoilla kuten haastatteluilla ja kyselyillä saatu tieto ei ole luotettavaa tai sitä ei saada. On myös mahdollista, että pitkän oppimisen takana ollutta työtehtävää ei pystytä itse kuvailemaan, jolloin havainnointi on hyvä keino. Havainnoinnilla on myös mahdollista tavoittaa ”hiljaista tietoa”, jonka kerääminen voisi muuten olla vaikeaa. (Kananen 2013, 88-89.)

Havainnointi jakautuu eri tyyppiseen havainnointiin tutkijan osallistumisen perusteella: suoraan havainnointiin, epäsuoraan havainnointiin, piilohavainnointiin sekä osallistuvaan havainnointiin. Suorassa ja osallistuvassa havainnoinnissa havainnoitavat toimijat ovat tietoisia havainnoinnista, kun taas piilo- ja epäsuorassa havainnoinnissa tutkija on piilossa. Huonona puolena tietoisuudesta havainnointiin on sen mahdollinen vaikutus havainnoitavien toimijoiden käytökseen. Havainnointi voidaan vielä jakaa strukturoituun ja strukturoimattomaan havainnointiin siinä käytettävien työkalujen perusteella. Strukturoidussa havainnoinnissa tiedetään mitä asioita havainnoitaessa seurataan. Välineenä voi olla esimerkiksi lomake, johon asiat merkitään ylös. Strukturoimattomassa havainnoinnissa tutkija kirjaa vain ylös mahdollisimman paljon aiheeseen liittyviä asioita ilma erillistä listaa. (Kananen 2013, 88-93.)

### **Aineistonkeruumenetelmien valinta**

Teemahaastattelujen avulla pyrittiin saamaan ymmärrys ilmiöstä. Työssä haastateltiin henkilöitä, joita ilmiö kosketti sekä ilmiöstä paljon tienneitä henkilöitä. Haastateltavat henkilöt olivat tutkittavan kappaleen eri valmistusvaiheissa mukana olleita työntekijöitä ja ulkopuolisia asiantuntijoita. Useista eri lähteistä kerätyn tiedon saturaation tapahtuessa voitiin olla varmempia tiedon luotettavuudesta. Toisaalta saadut tiedot saattoivat olla ristiriitaisia henkilöiden eri taustojen takia, joka vaikeuttaa tulkintojen tekemistä. Haastattelut pyrittiin ensisijaisesti suorittamaan kasvotusten, mutta tarvittaessa käytetään puhelinta. Haastattelut pyrittiin nauhoittamaan digitaalisella ääninauhurilla, jolloin tekstin litterointi voidaan suorittaa rauhassa ja palata tarvittaessa jokaiseen haastatteluun. Toinen vaihtoehto oli tehdä haastattelun aikana muistiinpanoja riittävällä tarkkuudella. Haastateltavilla henkilöillä oli eri vahvuuksia

ja he olivat erikoistuneet eri asioihin. Haastattelujen teemat olivat hitsaus, jännitystenpoistohehkutus, koneistus ja mittaus.

Teemahaastattelujen lisäksi työssä käytettiin havainnointia. Havainnoinnin avulla oli mahdollista saada todellinen käsitys työntekijöiden tavasta suorittaa työtehtävät ja valmistuksen eri vaiheet. Työssä käytetty havainnointi oli suoraa havainnointia, jossa havainnoitavat työntekijät huomasivat havainnoinnin. Havainnoitaessa työn suorittamista työpaikalla saattavat työntekijät suorittaa työtehtävänsä normaalia huolellisemmin ja oikeaoppisemmin, kuin he ilman havainnoitsijan läsnäoloa sen suorittaisivat. Havainnointi suoritettiin osana kvalitatiivista tutkimusta. Havainnointi oli strukturoitua havainnointia, jossa seurattiin alustavien syy-seuraussuhteiden kautta löytyneitä tekijöitä, kuten: ”kappaleen hitsausjärjestys”.

### 2.3 Teemahaastatteluaineiston analyysimenetelmä

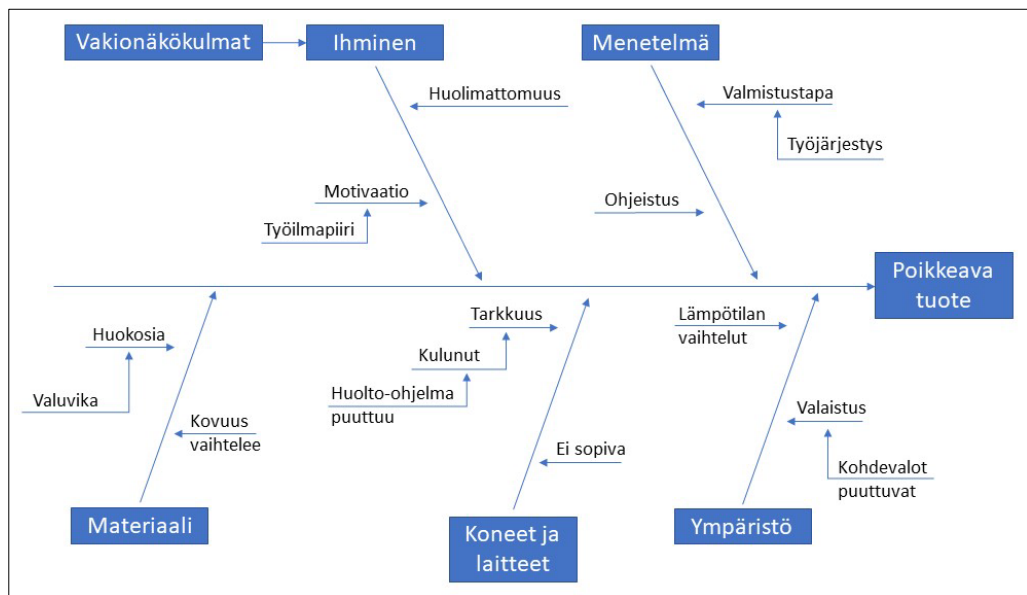
Kerätty aineisto on analysoitava, jotta siitä voidaan muodostaa päätelmiä. Analyysin avulla aineistosta erotellaan keskeiset ja tarpeelliset asiat. Kerätty aineisto analysoidaan, eli sitä tulkitaan ja käsitellään, jotta pystytään muodostamaan tietoa tutkittavasta ilmiöstä.

Aineiston analysointi lähtee aineiston hajottamisesta. Aineisto rikotaan eri asiasisältöihin, minkä jälkeen asiasisältö yhdistetään uudestaan kuvaukseksi ilmiöstä. Kuvaus on tutkijan näkemys, koska tutkija muodostaa sen omalla tulkinnallaan. Teemahaastattelujen tallenteet on ensin saatava kirjalliseksi eli litteroitava, jotta niitä pystytään käsittelemään.

Kirjallisen aineiston käsittely alkaa segmentoinnilla, jossa se jaetaan asiasisältöihinsä. Seuraavaksi tehdään koodaus eli luokittelu, jossa jokainen luokka saa numeron tai nimen. Luokittelu muokkautuu, kun ymmärrys kasvaa työn edetessä. Luokittelun jälkeen samaa tarkoittavat segmentit voidaan kirjoittaa yhden koodin alle. Lopuksi aineisto taas yhdistetään kuvaukseksi ilmiöstä ja tehdään siitä tulkinta. (Kananen 2013, 103-104.)

Aineiston tulkinta ja siitä tehtävät johtopäätökset ovat haastava vaihe. Tähän ei ole mitään tulkintasääntöjä kvantitatiivisen tutkimuksen tavoin. Aineiston avulla pyritään vastaamaan tutkimuskysymyksiin ja saamaan vastaus tutkimusongelmaan. Tulkintaa varten aineistosta saatavan kuvan hahmottamiseen voi käyttää syy-seuraussuhteita, toisiaan tukevia aineistoja ja erilaisia yhdistäviä tekijöitä (Kananen 2013, 103-104.)

Syy-seuraussuhteiden löytämiseen on olemassa paljon käytetty syy-seuraus-analyysi. Syy-seuraus-analyysi perustuu syy-seurauskaavioon, jonka avulla syiden ja seurausten suhteet saadaan ilmaistua yksinkertaisesti ja helposti. Kaaviota kutsutaan myös kalanruotokaavioksi sen ulkonäön takia (ks. kuvio 4). Syy-seurauskaavio on tarkoitettu nimenomaan laatuongelmien ja tekijöiden välisten suhteiden selvittämiseen. (Kume 1998, 28-29.)

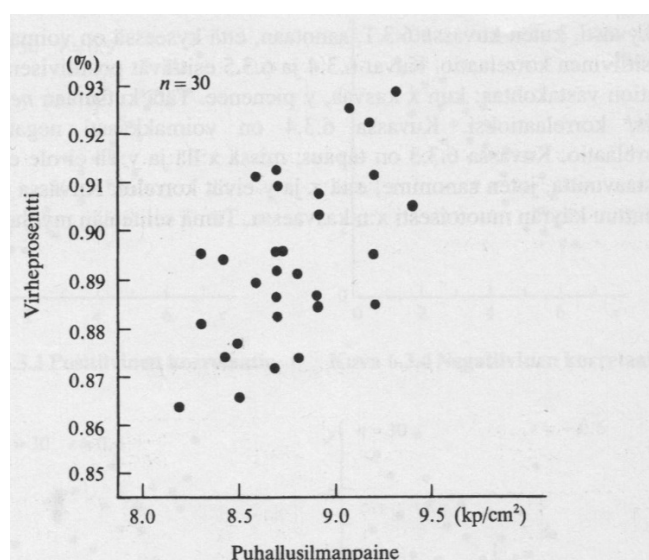


Kuvio 4. Esimerkki syy-seurauskaaviosta (Peuranen 2019, 10).

## 2.4 Tilastollisen aineiston analyysimenetelmät

Tilastollinen aineisto on analysoitava, että siitä voidaan muodostaa päätelmiä. Analyysimenetelmät valittiin aineistossa käytettyjen mittareiden ja asteikoiden perusteella. Tilastollisen aineiston analysoinnissa käytettiin hajontakuvaajia ja regressioanalyysia.

Hajontakuvaajien avulla voidaan tutkia kahden toisiin liittyvän muuttujan suhdetta, kuten kappaleen mittojen muuttumista työstönopeuteen nähden. Toinen tutkittavista muuttujista kuvaa tutkittavaa laatuominaisuutta ja toinen siihen vaikuttavaa tekijää. Hajontakuvaaja muodostetaan sijoittamalla laatuominaisuutta kuvaavat muuttajat pystyakselille (Y) ja niihin vaikuttavan tekijän arvot vaakakselille (X). Hajontakuvaaja esitetty kuviossa 5. (Kume 1998, 70).

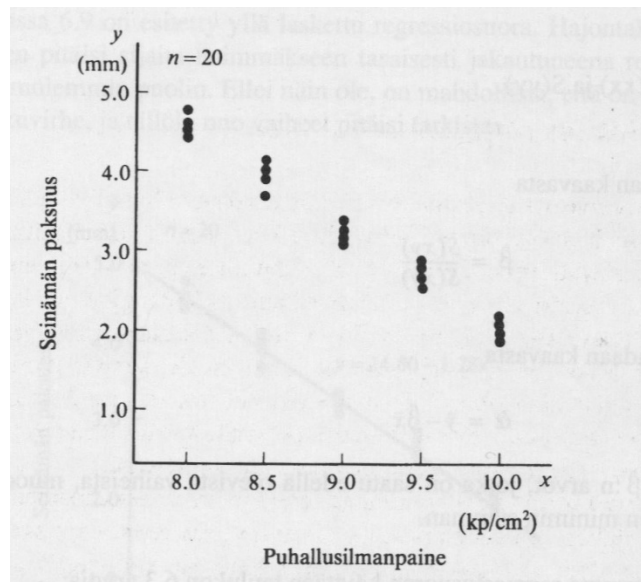


Kuvio 5. Esimerkki hajontakuvaajasta (Kume 1998, 73).

Hajontakuvaajasta tulkitaan muuttujien välistä suhdetta eli korrelaatiota. Esimerkiksi kuviossa 5 on havaittavissa mahdollinen positiivinen korrelaatio. Jos pisteet ovat tiiviisti ja muodostelma muistuttaa viivaa kyseisten muuttujien välillä on korrelaatio.

Hajontakuvaajan lisäksi korrelaatio voidaan laskea erillisten kaavojen avulla. Mitä lähempänä numeroa 1 tai -1 tulos on, sitä suurempi korrelaatio on kyseessä (Kume 1998, 76).

Regressioanalyysi soveltuu riippuvan ja riippumattoman muuttujan välisten riippuvuuden selvittämiseen. Regressioanalyysissä riippuva muuttuja Y-akselille ja riippumaton muuttuja X-akselille. (Kume 1998, 84-85). Esimerkki regressioanalyysistä kuviossa 6.



Kuvio 6. Esimerkki regressioanalyysistä (Kume 1998, 85).

Hajontakuvaajia ja regressioanalyysia käytettiin muuttujien välisen suhteen perusteella. Hajontakuvaajia käytettiin aineistolla, joiden muuttujat olivat toisistaan riippuvaisia ja regressioanalyysia toisistaan riippumattomien muuttujien kanssa.

### 3 Valmistuksen päävaiheet

Kappaleen valmistuksessa oli useita eri vaiheita. Valmistuksen päävaiheet olivat hitsaus, jännitystenpoistohehkutus, koneistus, pintakäsittely ja kokoonpano. Tässä

työssä keskityttiin vain kokoonpanon alkuvaiheessa mitattuun johdekelkan kulkulinjan suoruuteen, joten sen jälkeiseen kokoonpanovaiheeseen ei tutustuttu. Kappaleen valmistukseen kuului kolme eri alihankkijaa, joille vaiheet jakautuivat seuraavasti: Ensimmäinen alihankkija hoiti levyjen leikkauksen, taivutuksen ja hitsauksen. Toinen alihankkija teki hitsatulle rakenteelle jännitystenpoistohehkutuksen. Kolmas alihankkija pohjamaalasi ja teki tarvittavat koneistukset kappaleelle. Pintakäsittely, mittaus ja kokoonpano tapahtuivat toimeksiantajalla.

Tietoperusta on jaettu valmistuksen päävaiheisiin, joissa keskitytään toleranssiylityksien syntyyn vaikuttaviin tekijöihin. Alustavaa tietoperustaa laajennettiin teemahaastattelujen avulla löytyneiden syy-seuraussuhteiden perusteella. Alustavat ja täydennetyt syy-seuraussuhteiden ajatuskartat on esitetty valmistusvaiheittain liitteissä 5-8 ja 10-13. Valmistuksen päävaiheet -kappaleessa tutustutaan myös työn loppuvaiheessa käytettyyn FEM-analyysiin.

### 3.1 Hitsaus

Hitsaus on kappaleen valmistuksen ensimmäinen vaihe. Ennen hitsausta kappaleen valmistamiseen tarvittavat levyosat leikataan ja taivutetaan. Hitsaus tapahtuu MAG-hitsauksena hitsaajan toimesta ilman robottia.

#### 3.1.1 MAG-hitsaus

MAG-hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, joka taas kuuluu kaarihitsaus prosesseihin. Kaarihitsausprosesseissa tarvittava lämpö saadaan aikaan sähköisellä valokäärällä ja se kuuluu sulahitsausprosesseihin. Kaarihitsausprosessien numerotunnukset alkavat numerolla 1.

Kaasukaarihitsauksessa valokaari syntyy perusaineen ja lisäaineen tai perusaineen ja elektrodin välille. Kaasukaarihitsauksessa käytetään nimensä mukaisesti suojakaasua, joka voi olla aktiivista tai passiivista eli inerttiä. Aktiivinen suojakaasu nimensä mukaisesti reagoi aktiivisesti hitsisulassa olevien aineiden kanssa, kun taas passiivinen

kaasu ei reagoi. Suojakaasun tehtävä on suojata hitsisulaa ympäröivältä ilmalta. Kaasukaarihitsausprosessien numerotunnukset alkavat numeroin 13. MAG-hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa käytetään aktiivista suojakaasua. MAG-hitsauksessa valokaari syntyy sulavan lisäainelangan ja perusaineen välille. MAG-hitsauksen numerotunnus on 135. (Lepola & Makkonen 2011, 10-11.) MAG-hitsausta kutsutaan usein virheellisesti MIG-hitsaukseksi prosessien ollessa lähes vastaavat. MAG-hitsauksesta poiketen MIG-hitsauksessa käytetään passiivista suojakaasua. Tämä ero käy ilmi suoraa hitsausprosessien nimien lyhenteistä, MAG-lyhenne tulee sanoista Metal Active Gas ja MIG-lyhenne sanoista Metal Inert Gas. Aktiivinen kaasu nimensä mukaisesti reagoi aktiivisesti hitsisulan kanssa prosessin aikana, kun taas passiivisen kaasun tehtävä on ainoastaan syrjäyttää haitalliset kaasut ja estää niiden reagointi hitsisulaan hitsausprosessin aikana. MIG-hitsausta käytetään ei-rautametallien hitsaamiseen, kuten titaani, alumiini tai kupari. MAG-hitsausta käytetään terästen hitsaamiseen. (Lepola & Ylikangas 2016, 71.)

### 3.1.2 Silloitushitsaus

Silloituksessa hitsattava rakenne hitsataan kasaan pienillä hitseillä. Näitä hitsejä kutsutaan siltahitseiksi. Silloituksen tarkoitus on pitää hitsattava rakenne kasassa lopullisten hitsien hitsausta varten. Väärällä siltahitsien sijoituksella ja hitsausjärjestyksellä voidaan rakenteeseen aiheuttaa muodonmuutoksia, jotka vahvistuva lopullisen hitsauksen aikana. Niiden on myös kestettävä lopullisen hitsauksen aiheuttamat jännitykset sekä kappaleen siirtelystä ja kääntelystä aiheutuvat voimat. Joissain tapauksissa siltahitsi on hiottava pois ja tämä täytyy huomioida sen sijoittelussa. (Lepola & Ylikangas 2016, 348-349.)

### 3.1.3 Teräsrakenteiden sisäiset jännitykset

Eri valmistusmenetelmät aiheuttavat teräsrakenteisiin sisäisiä jännityksiä. Sisäiset jännitykset esiintyvät ilman ulkoista kuormaa ja ovat luonteeltaan sekundaarisia jännityksiä. Jännityksiä aiheutuu ainakin seuraavista syistä:

- Materiaalin myötääminen on epätasaista kylmämuovauksen yhteydessä. Esimerkiksi särmäyksessä tai kylmänä tehtävissä oikomisissa.

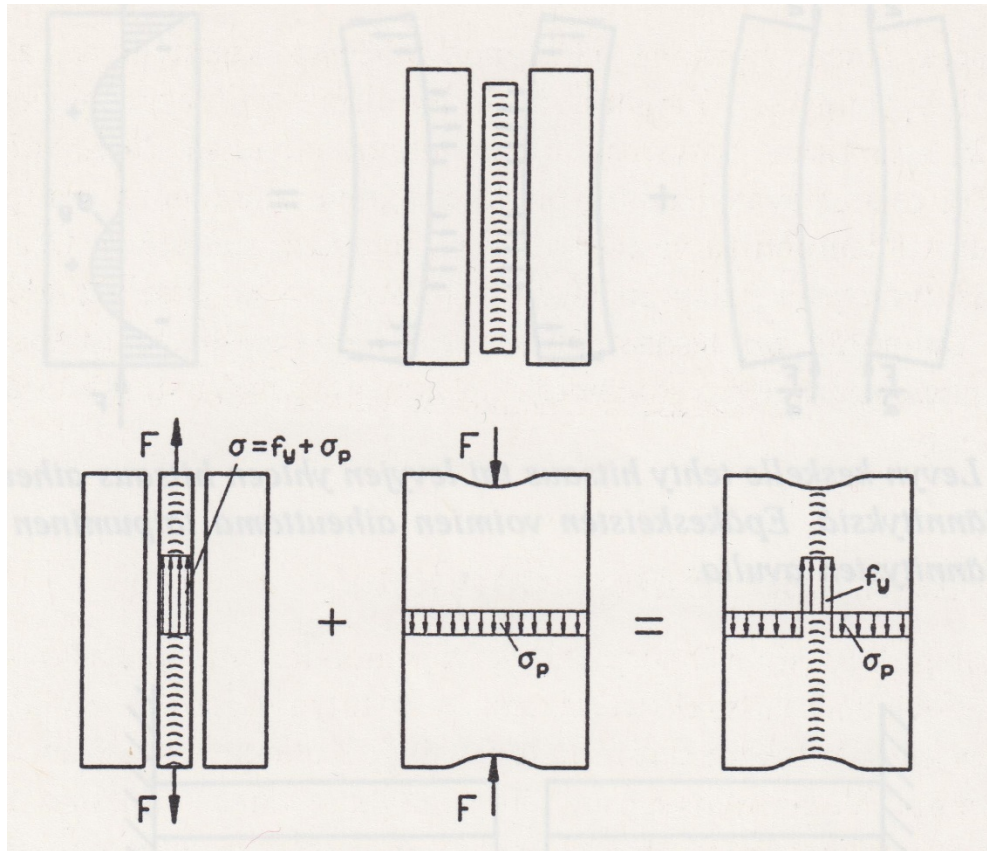
- Valssauksen jälkeen epätasainen jäähtyminen.
- Epätasaisesti tapahtuva kuumennus eri työvaiheissa, kuten hitsauksessa, polttoleikkauksessa tai oiottaessa kuumilla. (Niemi & Kemppi 1993, 167.)

#### 3.1.4 Hitsausjännitykset

Hitsauksessa kappaleeseen tuodaan pistemäisesti lämpöä, joka aiheuttaa rakenteesseen jännityksiä. Jännitykset syntyvät, kun tiettyyn kohtaan tuodaan hitsauksen yhteydessä lämpöä. Hitsaus aiheuttaa lämpötilan nousua tietylle alueelle, joka lämpölaajenemisen takia pyrkii laajenemaan. Lämpötila ei ole kuitenkaan noussut, kun tietyllä alueella, jolloin lämmitetty alue ei pääse laajenemaan ja alueelle muodostuu puristusjännityksiä. Nämä puristusjännitykset lähentelevät raaka-aineen myötörajaa. Lämpötilan noustessa noin 1000 °C rakenteen jännitykset ovat matalat raaka-aineen ollessa pehmeässä tilassa. Lämpötilan noustessa alkaa kiderakenne muuttumaan austeniittiseksi. Muutos alkaa tapahtumaan noin 700 °C lämpötilassa. Hitsisulan lämpötilan on noin 1600 °C, jolloin materiaalin lujuus on käytännössä kadonnut. Hitsauksen jälkeen alkaa jäähtyminen, jossa lämpötila alkaa laskea ja hitsi jähmettyy. Lämpötilan laskiessa alkaa rakenne kutistua ja lujuus palautua. Tässä vaiheessa puristusjännitykset alkavat poistumaan ja vetojännitykset kehittymään niiden tilalle. Lämpötilan laskiessa vetojännitykset kasvavat koko ajan. Vetojännitykset pysyvät raaka-aineen myötörajan suuruisena ja kasvavat jäähtymisen edetessä myötörajan kasvaminen myötä. (Lepola & Ylikangas 2016, 339-341.)

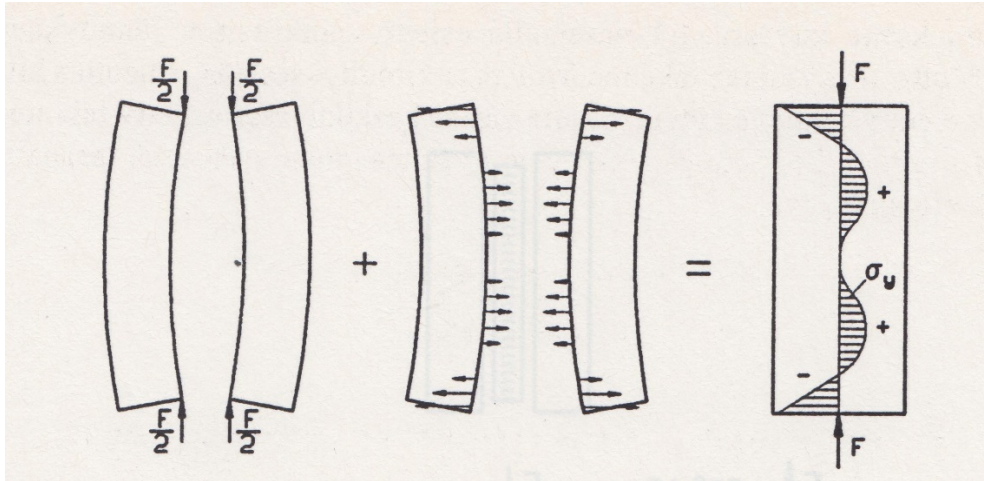
Hitsissä olevat jännitykset voidaan jakaa pitkittäis-, poikittais- ja paksuussuuntaisiin jännityksiin. Pitkittäissuuntaisen hitsausjännityksen syntyä havainnollistaa kuvio 7. Kuviossa hitsi on lämpövyöhykkeineen irrotettu levyistä, joihin se oli kuvitteellisesti hitsattu. Kuvio esittää liioitellusti, kuinka hitsi on kutistunut ja levyt pysyneet alkupeiräisessä mitassaan. Jos rakenne halutaan palauttaa takaisin tilanteeseen ennen hitsin leikkausta, niin hitsiä on venytettävä pidemmäksi voimalla  $F$ . Liittämisen jälkeen vastaavasti voima  $F$  yrittää puristaa levyjä kasaan pitkittäisessä suunnassa. Tämä vastaa tilannetta, jossa levyä kuormitettaisiin vastaavalla ulkoisella voimalla. Sillä erolla, että hitausjännitys ei saa rakennetta nurjahtamaan. Hitsausjännityksen suuruus vastaa irrotetun kaistaleen myötökuormaa. (Niemi & Kemppi 1993, 168.)





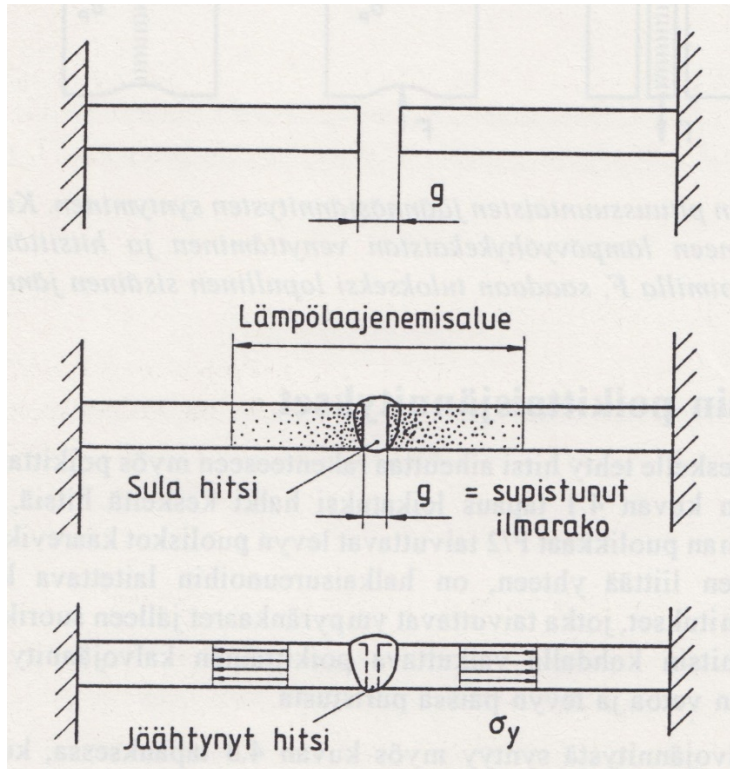
Kuvio 7. Pitkittäissuuntaisen hitsausjännityksen syntyminen (Niemi & Kemppe 1993, 169)

Pitkittäissuuntaiset hitsausjännitykset aiheuttavat levyihin myös poikittäissuuntaisia jännityksiä. Kuviossa 8 havainnollistetaan tilannetta, jossa kuvion 7 levy on leikattu hitsin keskeltä puoliksi. Voima  $F/2$  kuvaa hitsin pitkittäissuuntaista jännitystä, joka pyrkii taivuttamaan levyjä kaareviksi. Levyjen suoristamiseksi tarvitaan poikittäissuuntaisia voimia levyn keskivaiheille suoristamaan levyä ja toisaalta vastavoimia reunoille ylläpitämään voimatasapainoa. Lopputuloksena leikkauksen kohdalla vaikuttaa kalvojännitys, joka levyn keskivaiheilla on vetojännitystä ja reunoilla puristusta. (Niemi & Kemppe 1993, 169.)



Kuvio 8. Pitkittäissuuntaisten jännitysten aiheuttama poikittaissuuntaiset jännitykset (Niemi & Kemppi 1993, 170)

Vastaavaa kalvojäännitystä syntyy myös silloin, kun hitsattavat levyt ovat jo kiinnitetty jäykkään rakenteeseen. Tätä havainnollistetaan kuviossa 9. Näiden jännitysten syntyminen perustuu samaan ilmiöön kuin muidenkin hitsausjännitysten. Hitsauksen aikana hitsillä ei ole lujuutta ja lämpötila saa sen laajenemaan. Ympäröivät rakenteet pysyvät kylminä eivätkä anna hitsille tilaa laajentua. Jäähdyessään ja lujuuden kasvaessa tyssäntynyt hitsi pyrkii vetämään hitsattuja levyjä lähemmäksi toisiaan. Tällä kertaa levyt ovat kiinnitetty jäykästi ympäröiviin rakenteisiin, jolloin hitsin kutistuminen muuttuu vetojännitykseksi. Jännityksen suuruus riippuu ympäröivän rakenteen jäykkyydestä. Jos ympäröivä rakenne antaa periksi niin syntyneet jännitykset pienevät ja muuttuvat osittain rakenteen kutistumaksi. Suurimmillaan jännitykset voivat olla myötörajan suuruisia. (Niemi & Kemppi 1993, 170.)



Kuvio 9. Poikittaisten jännityksien syntyminen, kun kutistuminen on estetty (Niemi & Kemppe 1993, 170)

### 3.1.5 Muodonmuutosten vähentäminen

Hitsauksessa syntyvien jäännösjännityksien aiheuttamien muodonmuutoksien syntymistä voidaan vähentää useilla eri keinoilla. Hitsauksessa syntyvää pituuskutistumaa voidaan ennaltaehkäistä seuraavilla toimenpiteillä:

- lämmöntuonnin minimointi
- katkohitsaus
- oikea hitsausjärjestys
- hitsien sijoittaminen symmetrisesti rakenteen neutraaliakseliin nähden
- monipalkohitsaus
- venyttävän pituussuuntaisen esijännityksen kohdistaminen hitsin lämpövyöhykkeen kohdalle
- siltahitsien silloitussuunta reunoilta keskelle sekä niiden käytön rajoittaminen. (Lepola & Ylikangas 2016, 343.)

Poikittaissuuntaisen kutistuman ehkäisyyn voidaan käyttää seuraavia menetelmiä:

- lämmöntuonnin minimointi
- taka-askelehitsaus
- turhan suurien pienahitsien välttäminen
- ilmarakojen pienentäminen
- railon valinta: molemminpuolinen hitsaus, X-railo
- osien paikallapito kiinnittimillä
- lyhyiden siltahitsien käyttö: siltojen välit vähintään 25 kertaa levynvahvuus. (Lepola ym. 2016, 343.)

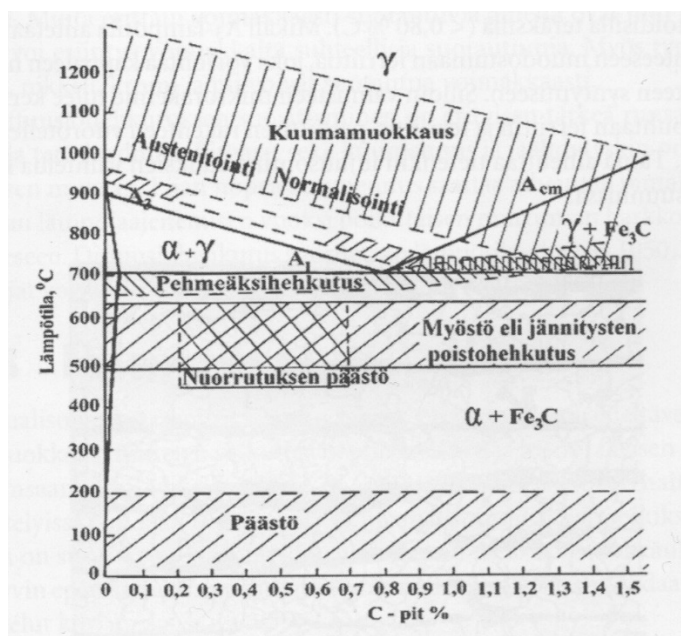
Kulmavetäytymistä voidaan ennaltaehkäistä seuraavilla menetelmillä:

- lämmöntuonnin minimointi
- sopiva railovalinta
- pienahitsin a-mitan ja palkojen määrän pienentäminen
- esijännityksien, taivutuksien ja ennakkokulmien käyttö kiinnittimien avulla
- rajoituksien mukainen katkohaitsien käyttö. (Lepola ym. 2016, 344.)

### 3.2 Jännitystenpoistohehkus

Teräsrakenteeseen syntyneet sisäiset jännitykset aiheuttavat rakenteeseen muodonmuutoksia useilla eri tavoilla. Hitsauksen aikana, kun jännitykset syntyvät tapahtuu esimerkiksi kulmavetäytymää, kaareutumista ja kutistumista. Materiaalia poistettaessa muutetaan rakenteen jäykkyyttä, joka aiheuttaa rakenteessa muodonmuutoksia jännitystilojen muuttuessa. Työssä tutkittavassa kappaleessa poistetaan huomattavia määriä materiaalia koneistamalla, jolloin kyseinen ilmiö muodostuu ongelmaksi. Sisäisten jännitysten poistamiseksi on kuitenkin olemassa eri menetelmiä ja yksi niistä on jännitystenpoistohehkus.

Jännityksenpoistohehkus, toiselta nimeltään myöstö, on tarkoitettu aikaisemmissa työvaiheissa syntyneiden jännityksien poistamiseen. Tällaisia työvaiheita ovat esimerkiksi hitsaus, koneistus, taonta ja mankelointi. Seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen jännitystenpoistohehkus tapahtuu 500-650 °C lämpötilassa (ks. kuvio 10).



Kuvio 10. Lämpökäsittelyjen alueet teräksille (Kivivuori & Härkönen 2009, 37)

Jännityksien poistuminen perustuu teräksen myötörajan alenemiseen lämpötilan noustessa, jolloin aikaisemmissa työvaiheissa syntyneet jännitykset laukeavat myötäämisen takia. Tämän takia korkeampi lämpötila käsittelyssä poistaa enemmän jännityksiä, kuin matalampi. Liian korkea lämpötila kuitenkin aiheuttaa teräksen rakenteeseen muutoksia, joka asettaa ylärajan lämpötilan nostamiselle. Käsittelyn parametrejä ovat lämpötilan lisäksi myös käsittelyn kesto sekä lämpötilan muutosnopeudet. Käsittelyn keston vaikuttaa oleellisesti käsiteltävän kappaleen materiaalivahvuus. Käsittelyajan laskemiseen löytyy erillisiä laskukaavoja. Käsittelyaikaan on olemassa ohje, jonka mukaan riittävä käsittelyaika on yksi tunti yhtä ainevahvuuden tuumaa kohden. (Kivivuori & Härkönen 2009, 45-46.)

Käsittelyn aikana tulee huomioida rakenteen asianmukainen tukeminen, ettei ei-haluttuja muodonmuutoksia pääse syntymään. Esimerkiksi pitkän kappaleen tukeminen vain päistä aiheuttaa myötörajan alentuessa pysyviä muodonmuutoksia kappaleessa. (Parviainen 2019).

### 3.3 Koneistus

Koneistus on materiaalia poistava valmistusmenetelmä, jossa materiaalia poistetaan lastuamalla. Lastuamiseen käytetään terää ja tarvittava liike saadaan aikaiseksi liikuttamalla työkalua tai koneistettavaa kappaletta. Koneistus on monipuolinen valmistusmenetelmä, jolla voidaan valmistaa esimerkiksi tasomaisia pintoja, tarkkamittaisia reikiä, teräviä nurkkia, sisäisiä ja ulkoisia muotoja tai täysin vapaamuotoisia pintoja. Koneistamalla pystytään valmistamaan tarkkamittaisia osia ja saavuttamaan hyvää pinnanlaatu. (Grzesik 2008, 3-4.)

Koneistus on kallis ja hidas valmistusmenetelmä, jota käytetään vain tarvittaessa. Yleensä tarve tulee kappaleelle määritetyistä mittatarkkuusvaatimuksista, joihin ei muilla valmistusmenetelmillä päästä. Koneistuksen voi jakaa rouhintakoneistukseen ja viimeistelykoneistukseen. Rouhintakoneistuksessa pyritään työkappaleesta poistamaan paljon materiaalia mahdollisimman tehokkaasti. Viimeistelykoneistuksessa tavoitteena on mittatarkkuus ja hyvä pinnanlaatu. (Ihalainen, Aaltonen, Aromäki, Sihvonen 2011, 140-141)

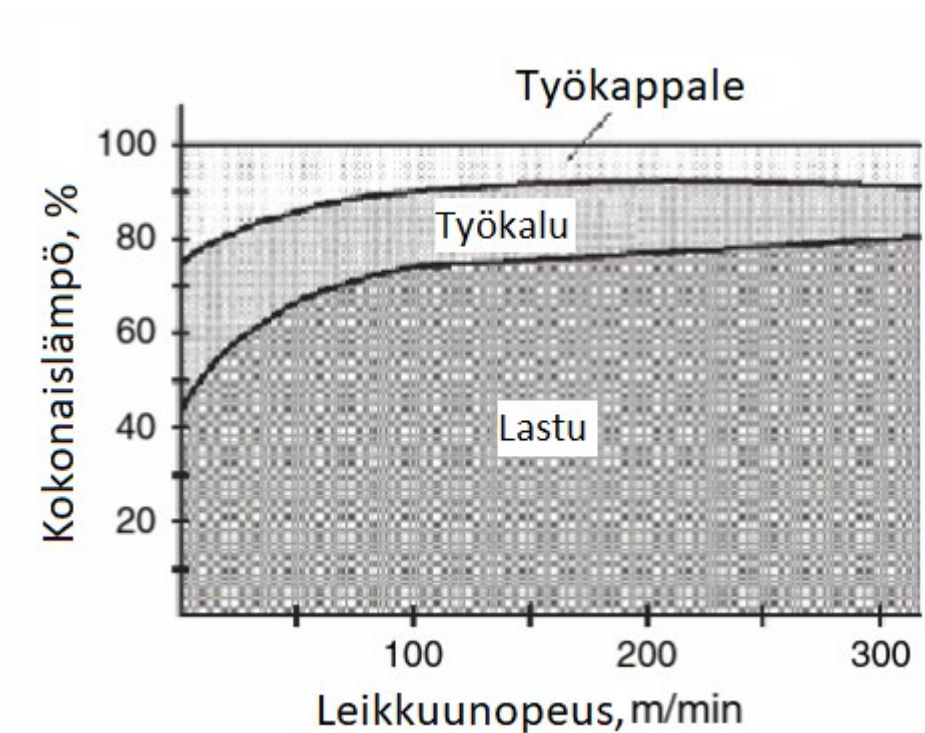
#### 3.3.1 Jyrsintä

Jyrsintä on yksi yleisimmistä koneistusmenetelmistä. Jyrsinnässä työkalu pyörii ja kappale on kiinnitettynä jyrsinkoneeseen. Jyrsintä on tehokas menetelmä ja lastuamismäärät voivat olla suuria. Jyrsinnällä voidaan valmistaa monimutkaisia muotoja, jotka ovat muille menetelmille mahdottomia. (Ihalainen ym. 2011, 163-165.)

Työstöarvoja jyrsinnässä ovat työkalun pyörimisnopeus, terän syöttönopeus ja lastuamissyvyys (Ihalainen ym. 2011, 163-165). Työstöarvot vaikuttavat muun muassa lastuamisvoimiin, tehontarpeeseen, lastuamisesta syntyvään lämpöön, pinnanlaatuun ja terän kestoikään (Ihalainen ym. 2011, 140-145.)

### 3.3.2 Lastuamislämpö

Lastuamistyöstä valtaosa muuttuu lämmöksi kitka-, muodonmuutos- ja lastuamistyön takia. Korkeaksi nouseva lämpötila nopeuttaa terien kulumista ja työstettävään kappaleeseen se aiheuttaa hallitsemattomia mittamuutoksia. Työstöarvot vaikuttavat oleellisesti lastuamislämmön suuruuteen. Kovametalliteriä käytettäessä lämpö niiden pintatasossa saattaa nousta jopa 900-1200 °C. Lastuamisessa suurin osa lämmöstä poistuu lastujen ja mahdollisen lastuamislämpönesteen mukana. Kuviossa 11 havainnollistetaan lastuamislämmön jakautumista prosentteina leikkuunopeuden funktiona. (Ihalainen ym. 2011, 145.)



Kuvio 11. Lastuamislämmön jakautuminen prosentteina (Grzesik 2008, 128)

### 3.3.3 Kappaleen kiinnittäminen

Pitkiä kappaleita kiinnitettäessä kappaleen ulkoneva osa on tuettava, ettei syntyisi jrsinnästä aiheutuvat värinät heikentäisi pinnanlaatua. Tuentaan soveltuu esimer-

kiksi säädettävä tukijalka. Tukijalka asetetaan kappaleen kiinnityksen jälkeen tukemaan ulkonevaa osaa. Tuenta ei saa aiheuttaa kappaleeseen muodonmuutoksia. (Maaranen 2012, 270)

Riittävän suuret värinät aiheuttavat muutoksia lastuamissyvytydessä. Tämä ilmenee äänenä työstön aikana ja epätasaisena pintana työstetyssä kappaleessa. Näin suuri värinä johtavat yleensä työkalun ennenaikaiseen rikkoutumiseen tai työkappaleen hylkäämiseen (Grzesik 2008, 3-4).

### 3.4 Mittaus

#### 3.4.1 Mittausvirheet

Mittauksissa on aina virhettä eri tekijöjen takia. Näitä ovat mitattu kappale, mittaaja, ulkoiset olosuhteet, mittaustapa, mittalaite, perusmitat ja muutokset, joita näissä kaikissa tapahtuu mittaamisen aikana. Mittausvirheet voidaan jakaa systemaattisiin, satunnaisiin ja karkeisiin virheisiin. (Andersson & Tikka 1997, 127.)

#### **Systemaattiset virheet**

Systemaattiset virheet ovat mittausvirheitä, jotka samaa arvoa mitattaessa ovat vakioarvoisia tietyissä olosuhteissa tai säännönmukaisella tavalla riippuvaisia olosuhteista. Systemaattisilla virheillä on tietty suunta ja suuruus ja ne voidaan poistaa matemaattisilla korjauksilla. Mittauksessa syntyneet virheet voidaan luokitella systemaattisiksi virheiksi sitä useammin mitä paremmin tilanteessa vallitsevat tekijät tunnetaan. On myös olemassa systemaattisiksi virheiksi luokiteltavia virheitä, joiden syntymekanismia ja suuruutta ei riittävän tarkasti tunneta ja niitä on käsiteltävä matemaattisesti kuten satunnaisvirheitä. Systemaattisina virheinä käsiteltävien virheiden ja aiheuttajien väliset yhteydet on tunnettava riittävän tarkasti, että korjaukset voidaan tehdä. Yleisimmät systemaattiset virheet liittyvät lämpötilaan, mittausvoimiin ja laitteiden kalibrointiin. (Andersson & Tikka 1997, 128-129)



### **Satunnaiset virheet**

Satunnaisen mittavirheen suuruus vaihtelee satunnaisesti toistettaessa samaa mitausta samoissa olosuhteissa. Satunnaisvirheiden suuruutta ei mittausteknisesti pystytä määrittämään, mutta toistuvilla mittauksilla niiden suuruudesta saadaan käsitys. Laskemalla keskiarvo useista mittauksista voidaan satunnaisvirheiden vaikutusta pienentää. (Andersson & Tikka 1997, 129)

### **Karkeat virheet**

Karkeat virheet voivat olla suuruudeltaan moninkertaisia aiempiin verrattuna. Ne ovat yleensä huolimattomuudesta tai erehdyksestä johtuvia, kuten mitta-asteikon väärin lukeminen. (Andersson & Tikka 1997, 130)

### **3.4.2 Virhelähteet**

Mittausvirheiden käsittelyn ja mittausepävarmuuden määrittelyn kannalta voi olla järkevää jakaa mittausvirheet on virhelähteisiin. (Andersson & Tikka 1997, 138)

### **Mittalaite**

Mittalaitteen kalibrointi on keskeisessä roolissa mittalaitteen tarkkuuden kanssa. Kalibroinnilla varmistetaan mitattavan suureen jäljitettävyys kansainvälisiin mittanormaaleihin. Mittalaitteen tyyppi, stabiilisuus ja huollontarpeet vaikuttaa kuinka usein mittalaite tulisi kalibroida. Mittavälineestä riippuen lämpötilaerot mittalaitteen osien välillä voivat aiheuttaa mittaustuloksessa vaihtelua. Niitä voidaan ehkäistä riittävän pitkällä lämpötilan tasaantumisajalla, laskennallisilla korjauksilla ja ympäristöolosuhteita parantamalla. Koskettavassa mittauksessa mittausvoima voi aiheuttaa taipumia mittalaitteessa, mitattavassa kappaleessa tai kosketuskohdassa. (Andersson & Tikka 1997, 139-140)

### **Mitattava kappale**

Yleisin mitattavassa kappaleessa vaihtelua aiheuttava tekijä on lämpötila. Lämpötilasta johtuvat vaihtelut ovat kuitenkin korjattavissa laskennallisesti. Muita vaihtelua aiheuttavia tekijöitä on mitattavan pinnan karheus, laatu, aaltomaisuus ja likaisuus. (Andersson & Tikka 1997, 139)

## **Olosuhteet**

Olosuhteet ovat merkittävä tekijä mittavaihtelun määrittelyssä. Keskeisin tekijä on lämpötila ja siinä tapahtuvat muutokset. Lämpötilan lisäksi muita tekijöitä ovat muun muassa ilmankosteus, ilmanlaatu ja värähtelyt. Suurta tarkkuutta vaativissa mittauksissa jopa valaistus saattaa aiheuttaa muutoksia siitä lähtevän lämpösäteilyn takia. (Andersson & Tikka 1997, 144-145)

## **Mittaaja**

Mittaaminen vaatii riittävää teoreettista koulutusta, mutta myös pitkälistä kokemusta. Mittaajalta vaaditaan tiettyjä ominaisuuksia, kuten stressin kestoa, huolellisuutta ja älykkyyttä. Näitä voi olla vaikea muuttaa edes koulutuksella. Empiirisissä tutkimuksissa on todettu toisen testihenkilön mittaustuloksissa jatkuvasti suurempi hajonta, kuin toisen testihenkilön. Älykkyydellä on merkitystä oman toiminnan kehittämisessä sekä karkeiden virheiden välttämässä. Tietyt ominaisuudet mittaajassa muuttuvat jatkuvasti. Niitä ovat motivaatio fyysinen kunto ja vireystila. Mittaajan näön erottelukyvyllä on merkitys erityisesti analogisia mitta-asteikkoja käytettäessä. (Andersson & Tikka 1997, 143-144)

### **3.4.3 Mittausepävarmuus**

Tuotetta tarkastettaessa mittaustuloksen tulisi olla luotettava. Mittauksesta saatu mittaustulos on kuitenkin vasta arvio mitatusta kohteesta ennen mittausepävarmuuden ilmoittamista. Mittausepävarmuus on aina olemassa, vaikka kaikki virhelähteet poistettaisiin. Seuraavat tekijät vaikuttavat mittausepävarmuuden suuruuteen:

- Vähäiset tiedot ympäristöolosuhteista
- Satunnainen vaihtelu ympäristöolosuhteissa mittauksen aikana
- Inhimilliset eroavaisuudet mittaajissa
- Käytettyjen mittalaitteiden lukematarkkuus eli resoluutio
- Täydellisesti toistuvista olosuhteista huolimatta ilmenevät vaihtelut

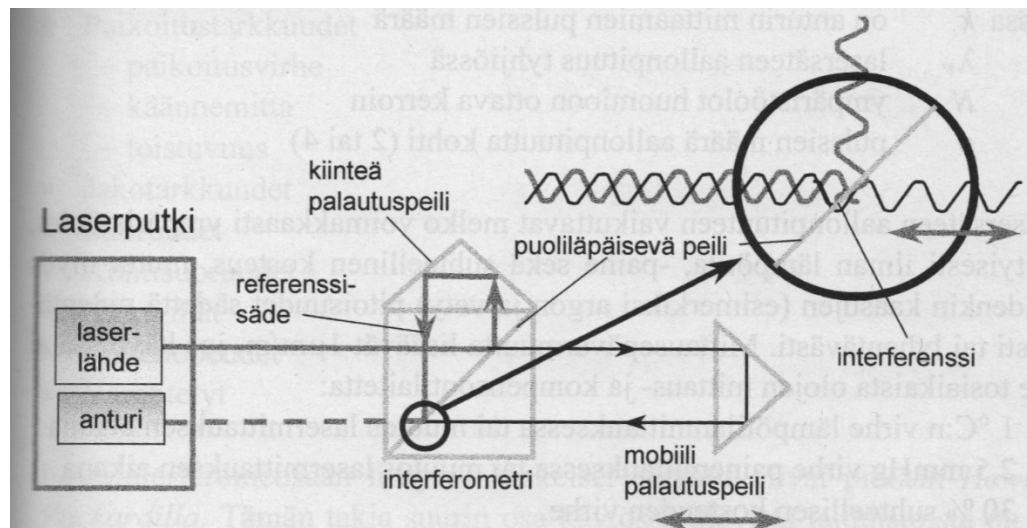
Mittausepävarmuus määritellään aina tilannekohtaisesti, jolloin mitattaessa samoilla laitteilla samoja kappaleita, mutta eri olosuhteissa mittausepävarmuus on eri suuruinen.

### 3.4.4 Suoruuden mittaus laserinterferometrillä

Laserinterferometrillä voidaan mitata suoruutta muutamalla eri menetelmällä. Menetelmät eroavat toisistaan käytettävien optiikoiden ja periaatteiden osalta. Tässä työssä keskitytään vain kulmamittaukseen perustuvaan menetelmään, koska sitä käytetään kappaleiden tarkistamiseen kokoonpanovaiheessa.

#### Laserinterferometri

Laserinterferometri perustuu valon interferenssi-ilmiöön. Laserinterferometrissä lähtee lasersäde, joka jaetaan kahteen suuntaan puoliläpäisevän peilin avulla. Nämä säteet kulkevat kumpikin eri reittiä takaisin puoliläpäisevälle peilille. Mittauksen aikana optiikoita siirtämällä valojen kulkemien reittien pituudet alkavat eroamaan toisistaan. Eripituiset reitit aiheuttavat säteiden välille vaihe-eron. Säteiden palatessa yhteen puoliläpäisevällä peilillä reitin pituuden muutoksesta aiheutunut vaihe-ero näkyy säteen vaiheiden vahvistumisena ja kumoutumisena. Laserinterferometrissä oleva anturi havaitsee vahvistumiset ja kumoutumiset pulsseina. Näin ollen siirtymät kehittävätkä pulsseja, jotka ovat verrannollisia lasersäteen aallonpituuteen. Lasersäteen aallonpituus on 0,000633 mm. Laserinterferometrin pääasiallinen käyttö on tarikoissa ja vaativissa mittauksissa, kuten työstökoneiden tarkastuksessa tai erilaisissa kalibroinneissa. Kuviossa 12 laserinterferometrin toimintaa havainnollistetaan pituuden mittaamiseen käytettävillä optiikoilla. (Andersson & Tikka 1997, 194-199)

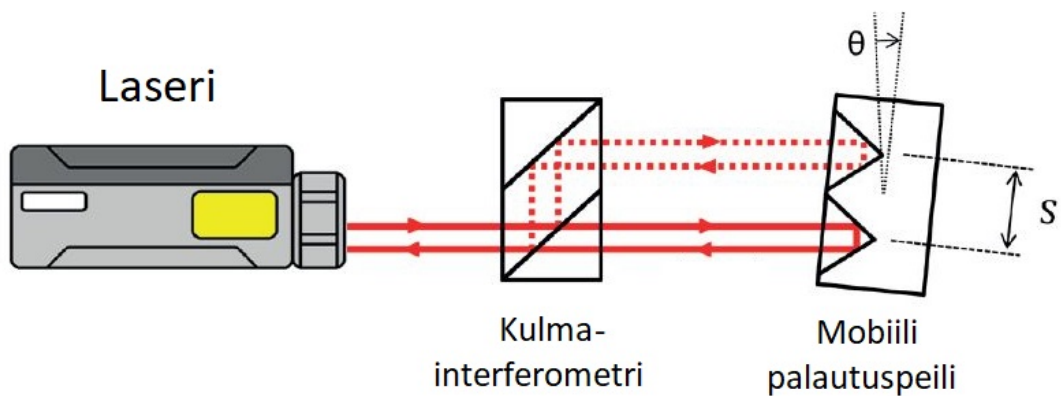


Kuvio 12. Laserinterferometrin toimintaperiaate (Andersson & Tikka 1997, 197)

Kuviossa 12 voidaan havaita palautuspeilin kautta kulkevan säteen matka muuttuvan tätä peiliä siirrettäessä.

### Kulmamittaus

Kulmanmittaamisessa hyödynnetään samaa ilmiötä, mutta siinä käytettävät optiikat eroavat pituuden mittaamisesta. Kuviossa 13 havainnollistetaan kulmamittausta laserinterferometrillä.



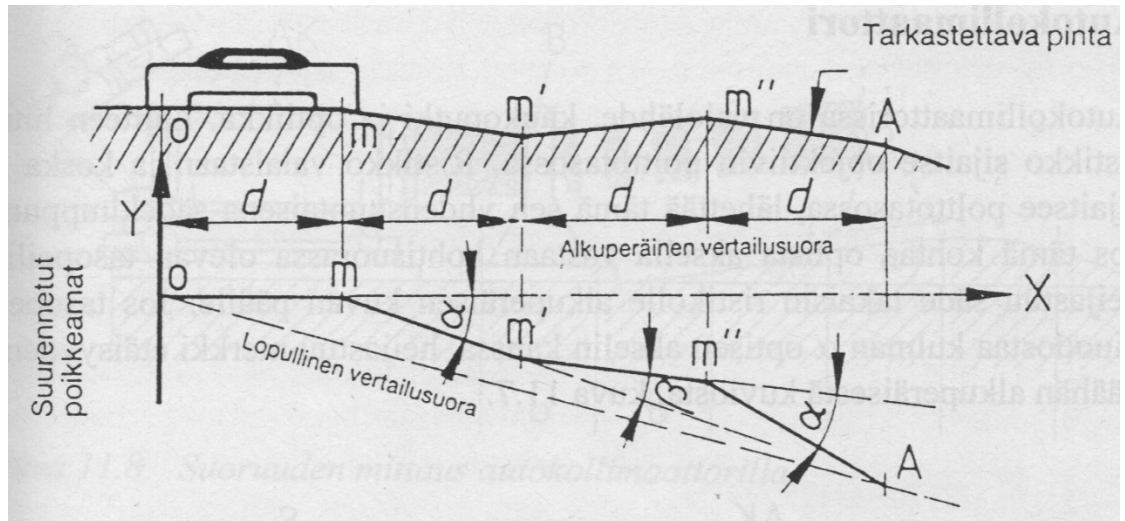
Kuvio 13. Kulmamittaus laserinterferometrillä (Chapman, Fergusson-Kelly, Holloway, Lock, Lee 2016, 2)

Kulmamittauksessa ero säteiden kulkemissa reiteissä syntyy mobiilin palautuspeilin tai interferometrin kallistumisesta. Kallistuskulman laskemiseksi käytetyn mittausohjelmiston pitää tietää käytetyn palautuspeilin mitat. Nämä mitat vaikuttavat oleellisesti kulmamittauksen tarkkuuteen. (Chapman ym. 2016, 1-6.)

### Suoruuden mittaus kulmapoikkeamilla

Suoruus voidaan mitata tekemällä useita kulmamittauksia siirtäen palautuspeiliä mitausvälin verran. Mittausväli on tulisi olla käytetyn tuen pituus, jolloin aina seuraavassa mittauskohdassa käytetyn tuen etureuna on siinä missä edellisessä mittauskohdassa oli sen takareuna. Periaate esitetty kuviossa 14, jossa mittausväliä kuvataan

merkillä  $d$ . Mittausten tuloksena saadaan jokaisesta mittauspisteestä kulma-arvo, joista laskemalla voidaan ratkaista suoruuden arvo. Tässä työssä käytettyjen laserinterferometrien ohjelmistot laskivat kulmamuutoksista automaattisesti suoruuden arvot.



Kuvio 14. Suoruuden mittauksen periaate (Andersson & Tikka 1997, 209)

Mittausvirheet laserinterferometriä käytettäessä mittausvälineen osalta koostuvat seuraavista tekijöistä: ympäristön lämpötila, ilmanpaine, ilmankosteus ja kaasupitoisuudet. Nämä vaikuttavat lasersäteen aallonpituuteen ja sitä kautta mittaustulokseen. Tarkkoja mittauksia tehtäessä laserinterferometrissä tulee olla olosuhdeanturi ja reaaliaikainen kompensointijärjestelmä (Andersson & Tikka 1997, 198). Taulukossa 1 on esitetty suoruuden mittauksen mittausalueet ja pienimmät mittauserävarmuudet eri mittalaitteilla. Taulukon mukaan laserinterferometrillä kulmamittaukseen perustuen suoruuden mittauksessa mittauserävarmuus 6000 mm matkalla on pienimmillään  $3,5 \mu\text{m}$ .

Taulukko 1. Suoruuden mittauksen mittausepävarmuudet eri laitteilla (Esala, Lehto, & Tikka 2003, 39)

*Taulukko 5.6 Suoruuden mittauksen mittausalueet ja pienimmät mittausepävarmuudet eri mittalaitteilla.*

Mittalaite	Mittausalue	Mittausepävarmuus [mm]
Tasolasi	0 – (200) mm	$\pm(0,0001 + L/200)$
Muodonmittauskoneet	0 – (200) mm	$\pm(0,0001 + L/200)$
Kiviviivain	0 – (3000) mm	$\pm(0,0005 + L/1000)$
Laser-interferometri Wollaston prismalla	0 – (30) m	$\pm(0,0005 + L/2000)$
Kulmanmittaukseen perustuen laser-interferometri vesivaaka	0 – (30) m 0 – (30) m	$\pm(0,0005 + L/2000)$ $\pm(0,001 + L/1000)$
Mittasilta	0 – (5) m	$\pm(0,001 + L/500)$
Pituuden- ja koordinaattimittauskoneet	0 – (3000) mm	$\pm(0,001 + L/1000)$
Hiusviivain	0 – (200) mm	$\pm 0,002$
Laser-suoruudenmittauslaite	0 – (30) m	$\pm(0,005 + L/500)$
Suuntauskaukoputki	0 – (30) m	$\pm(0,01 + L/250)$
Teräsviivain	0 – (5) m	$\pm(0,01 + L/250)$
Kiristetty lanka ja mikroskooppi	0 – (30) m	$\pm(0,01 + L/500)$
Vaaituskone	0 – (1000) m	$\pm(0,015 + L/200)$
Teodoliitti	0 – (30) m	$\pm(0,02 + L/200)$

L = mitatun elementin pituus metreinä

### 3.4.5 Virheen eliminointi 180°:n käännöllä

Tiettyissä mittauksissa tapahtuvia virheitä voidaan eliminoida 180°:n käännöllä. Se soveltuu käytettäväksi, kun mittaustarkkuudessa joudutaan menemään olosuhteisiin nähden tarkkuuden ääri rajoille. Menetelmä soveltuu hyvin työstökoneen karan heiton, liikkeiden suoruuden ja kohtisuoruuden tarkistamiseen mekaanisin mittavälinein. (Andersson & Tikka 1997, 147-148)

## 3.5 FEM-analyysi

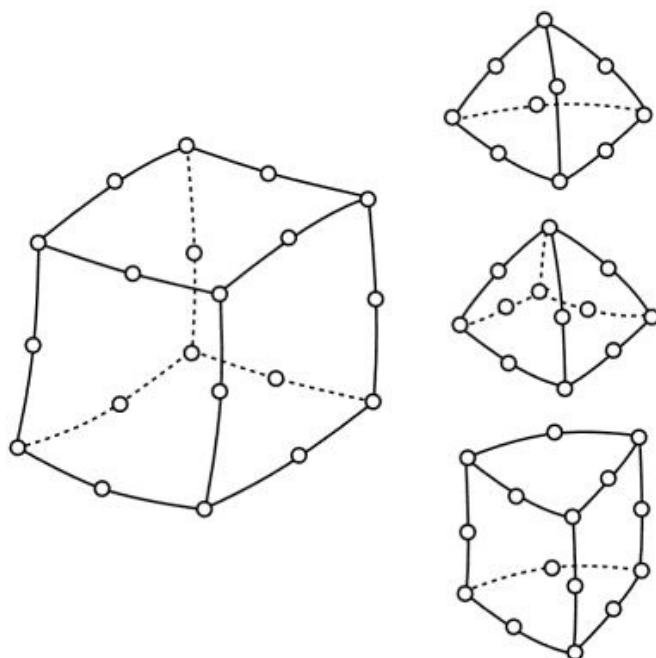
FEM lyhenne tulee sanoista Finite Element Method, joka suomeksi tarkoittaa elementtimenetelmää. Elementtimenetelmää käytetään paljon lujuustarkastelussa, mutta se soveltuu esimerkiksi lämmönsiirto- ja virtausanalyysiin.

Suurin osa todellisista laskenta ongelmista on liian monimutkaisia ratkaistavaksi analyttisillä menetelmillä. Varsinkin tilanteissa, joissa vaaditaan epälineaarisia tai dynaamisia analyyseja, analyttisien menetelmien käyttö on käytännössä mahdotonta. (Huei-Huang 2018, 35-36).

Elementtimenetelmässä mallin geometria jaetaan useisiin pieniin geometrisesti yksinkertaisiin osiin, joita kutsutaan elementeiksi. Näillä elementeillä on tietty koko, jolloin ne ovat äärellisiä englanninkielisen sanan ”Finite” mukaisesti. Jokaiselle elementille muodostetaan yhtälöt, jotka kaikki ratkaistaan samanaikaisesti. Elementit yhdistyvät toisiinsa niiden reunojen ja kärkipisteiden kohdilla olevista solmuista. Laskennassa ohjelmisto laskee esimerkiksi solmukohtien siirtymät. Jokaisen solmukohtien siirtymä on vektori, jolla kolmiulotteisissa tapauksissa on kolme komponenttia ja laskennassa ratkaistavien tekijöiden määrä on silloin kolme kertaa elementtien solmujen määrä. (Huei-Huang 2018, 35-36.)

### 3.5.1 Umpinainen malli

Elementtimenetelmää voi ohjelmistosta riippuen käyttää useilla eri malleilla. Yksi näistä on umpinainen malli. Umpinaista mallia tulisi käyttää tilanteissa, joihin muuntuylliset mallit eivät sovellu. Umpinaisella mallilla laskenta on hitaampaa, kuin esimerkiksi kaksiulotteisella- tai kuorimallilla. Jos laskettavan kappale soveltuu yksinkertaisesti kaksiulotteiseksi malliksi, niin umpinaisen mallin käytössä ei ole järkeä. (Huei-Huang 2018, 209). Umpinaisella mallilla laskettavaksi soveltuu kappaleet, joissa on suuret materiaalivahvuudet muihin mittoihin nähden tai paljon monimutkaisia muotoja. Kuviossa 15 on esitetty kolmiulotteisiin umpinaisiin malleihin käytettyjä elementtejä, joissa näkyvät solmupisteet.

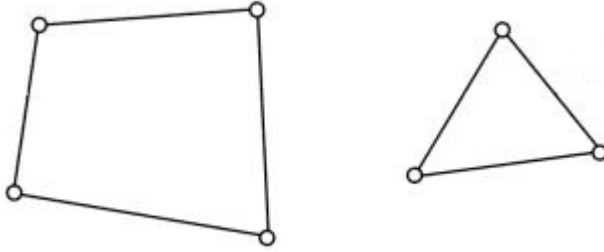


Kuvio 15. Esimerkkejä umpinaiisiin malleihin käytetyistä elementeistä (Huei-Huang 2018, 38)

### 3.5.2 Kuorimalli

Elementtimenetelmässä laskentaan voidaan käyttää kolmiulotteista kuorimallia. Kuorimallin käyttö soveltuu kappaleisiin, joissa yksittäisten pintojen materiaalivahvuus pysyy samana ja on ohut suhteessa muihin mittoihin. Kuorimallilla ei ole paksuutta, jolloin laskennassa siihen käytetään erilaisia elementtejä kuin umpinaiisiin malleihin. Oikein käytettynä kuorimallilla saadaan suuria etuja verrattuna umpinaiseen malliin: kuorimallin tekeminen on yleensä helpompaa ja pienemällä laskenta-ajalla saadaan tarkempia tuloksia, kuin umpinaisella mallilla. (Huei-Huang 2018, 238.) Kuorimallin elementtejä solmukohdilla esitetty kuviossa 16.





Kuvio 16. Esimerkkejä kuorimalleihin käytettävistä elementeistä (Huei-Huang 2018, 38)

## 4 Työn toteutus

Työn toteutuksessa käydään läpi tutkimuksen eri vaiheet. Näitä ovat valmistuksen päävaiheista tehdyt haastattelut, tilastollisen tutkimusaineiston kerääminen ja analysointi sekä rakenteen analysointi elementtimenetelmällä.

Ennen haastatteluja aiheista oli kerätty alustavaa tietoperustaa ja laadittu teema-haastattelun rungot haastatteluja varten. Teemahaastattelujen rungot oli muodostettu alustavien syy-seuraussuhteiden perusteella, joita täydennettiin haastattelussa ilmenneiden asioiden perusteella. Alustavat ja lopulliset syy-seuraussuhteet on esitetty liitteissä 5-8 ja 10-13.

### 4.1 Alihankkijan haastattelu: Hitsaus

Hitsausalihankkija on keskeisessä roolissa kappaleen valmistuksessa. Hitsausalihankkija hankki tarvittavat materiaalit, valmistelee aihiot hitsausta varten sekä suorittaa kappaleen hitsauksen.

#### **Haastattelu toteutus**

Haastattelu eteni liitteessä 1 esitetyn rungon mukaisesti. Haastattelun pääkohtia olivat hitsausparametrit, aihoiden asetus, hitsausjärjestys, olosuhteet ja aihiot. Pääkoh-

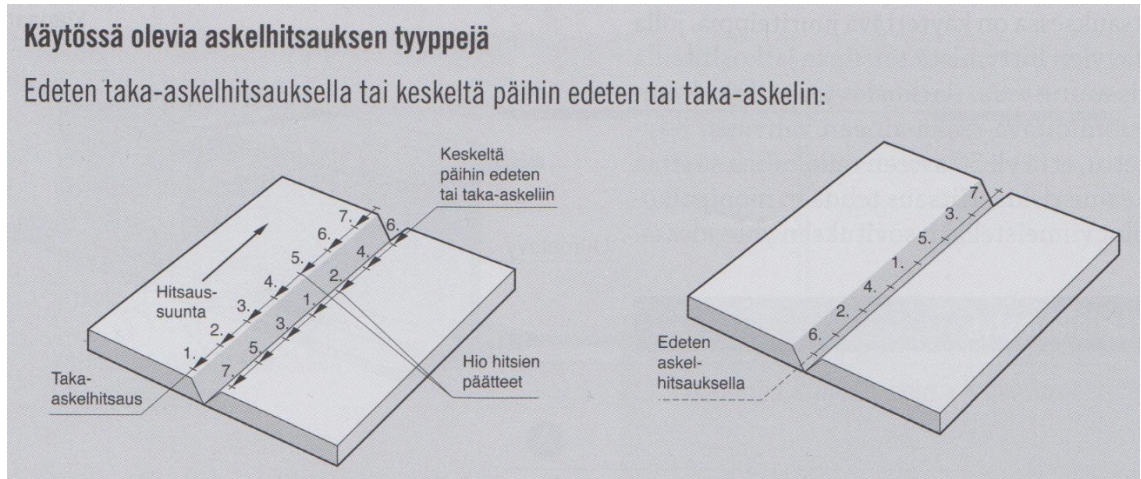
dat oli valittu tietoperusta perusteella. Hitsausparametrit vaikuttavat oleellisesti lämmöntuontiin sekä sen vaihteluun parametrien muuttuessa. Aihoiden asetus pyrki selvittämään ilmarakojen sekä mahdollisten esijännitysten käyttöä sekä toistuvuutta eri kappaleiden välillä. Hitsausjärjestyksellä on suuri vaikutus hitsausjännitysten kautta muodonmuutosten syntymiseen. Olosuhteissa kiinnitettiin huomiota soveltuvaan ympäristön ja työkaluista johtuviin tekijöihin vaihtelun syntymisessä. Aihioilla haettiin materiaaleissa ja aihoiden valmistuksessa syntyviä muutoksia.

Haastattelut tehtiin hitsaajalle ja kyseisen hitsaajan esimiehelle. Haastattelulla hitsaajalla on yli kymmenen vuoden kokemus kyseisten kappaleiden hitsaamisesta. Haastattelut suoritettiin haastateltaville erikseen, jotta esimiehen läsnäolo vaikuttaisi mahdollisimman vähän haastatteluun. Hitsaajan haastattelu tapahtui hitsaustyön ohessa, jolloin työn etenemistä oli mahdollista seurata. Kumpaankaan haastatteluun ei käytetty nauhoitusta, vaan haastattelun edetessä tehtiin muistiinpanoja.

Keskeisenä ajatuksena teemojen ja kysymyksiä takana oli jäännösjännitystilojen syntyminen hitsauksessa sekä mahdollisuus niiden vaihteluun eri kappaleiden välillä.

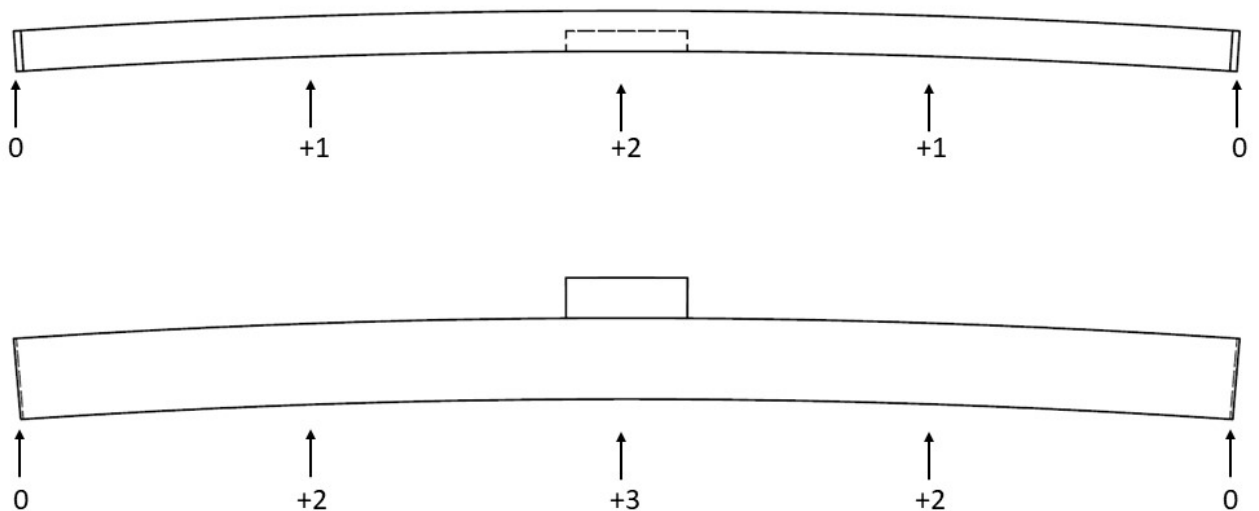
### **Haastattelun tulokset**

Haastattelussa selvisi, että kyseisen kappaleen valmistamiseen on yksityiskohtaiset työohjeet. Työohjeista selviää ohjeelliset hitsausparametrit, aihoiden asettelut ja hitsausjärjestys pääpiirteittäin. Haastattelussa kuitenkin ilmeni, että esimerkiksi hitsausparametrit ovat henkilökohtaiset ja muuttuvat hitsaajan tottumuksien mukaan. Hitsauksessa syntyviä muodonmuutoksia pyritään ehkäisemään useilla eri menetelmillä. Hitsausjärjestyksissä hyödynnetään askelhitsausta, joka vähentää erityisesti poikittaiskutistumaa hitsauksessa. Tässä tapauksessa kyseessä on askelhitsaus, jossa edetään keskeltä päytyä kohti kuvion 17 osoittamalla tavalla.



Kuvio 17. Askelhitsauksen tyyppiä (Lepola & Ylikangas 2016, 352)

Ennen hitsausta osien asettelussa käytetään ennakkokulmia. Levyosat kiinnitetään ennen varsinaista hitsausta siltahitseillä, että rakenteen jäykkyys olisi mahdollisimman hyvä ennen lopullisten palkojen hitsaamista. Siltahitseillä kasattu kappale esijännitetään taivuttamalla sitä kokemusten mukaan tiettyyn suuntaan tietyn verran. Valmiille kappaleelle tehdään suoruusmittaukset käyttäen linjalankaa, jotka kirjataan mittauspöytäkirjaan. Mittauspöytäkirjaan kirjataan suoruusmittaukset viidestä kohdasta kahdessa eri suunnassa, kappaleen sarjanumero ja mittajaan nimi. Esimerkki mittauspöytäkirjasta kuviossa 18.



Kuvio 18. Hitsauksen mittauspöytäkirjan periaatekuvio

### **Yhteenveto**

Hitsaajien välillä hitsausparametreissa ja hitsausjärjestyksissä voi olla pieniä eroja. Kyseisten kappaleiden hitsaamista tekee useampi hitsaaja. Yksittäisten kappaleiden ja sarjojen hitsaamisen tekee kuitenkin sama hitsaaja. Hitsattu kappale mitataan ja siitä täytetään mittauspöytäkirja, josta ilmenee kappaleen sarjanumero, tekijä ja suoruuksittauksen tulokset kahdessa eri suunnassa.

## **4.2 Alihankkijan haastattelu: Jännitystenpoistohehkutuksen**

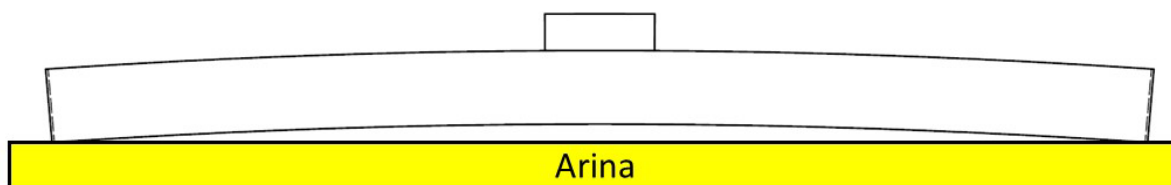
### **Haastattelun toteutus**

Haastattelu pohjautui liitteessä 2 esitettyyn teemahaastattelun runkoon. Haastattelu suoritettiin puhelimen välityksellä. Haastattelua ei nauhoitettu, vaan haastattelun edetessä tehtiin muistiinpanoja. Haastateltava on jännitystenpoistohehkutuksista vastaava työntekijä. Haastattelussa pääkohtia olivat kappaleen asettelu uunissa, lämpökäsittelyn parametrit, työntekijät ja laitteisto.

Kappaleen asettelulla uunissa haluttiin selvittää kappaleiden asentoa, sijoittelu, määrä sekä lämpötilan mittaus lämpökäsittelyn aikana. Parametreihin kuuluivat lämpökäsittelyn kesto, lämpötila sekä lämpötilojen muutosnopeudet. Työntekijöillä haettiin tietoa, osallistuuko käsittelyyn useampi kuin yksi henkilö, jolloin erot toimintavoimissa toiminta tavoissa voisivat aiheuttaa vaihtelevuutta. Ympäristön vaikutuksia selvitettiin lämpötilan ja ilmastokasteuden osalta. Laitteistossa kysyttiin käsittelyyn käytettävien uunien määrää sekä mahdollisia eroja.

### **Haastattelun tulokset**

Kyseisten kappaleiden jännitystenpoistohehkutus tapahtuu aina samassa uunissa. Uunin mitat ovat suunnilleen 2000x2000x13000 mm. Kappaleiden sijoitus ja määrä uunissa vaihtelee tilanteen mukaan. Uunissa on pääsääntöisesti myös muita kappaleita käsiteltävänä. Kappaleet asetetaan arinoita vasten kuvion 19 mukaiseen asentoon.



Kuvio 19. Kappaleen asettelu uunissa käsittelyaikana

Kappaleiden lämpötilaa seurataan käsittelyaikana neljällä lämpötila-anturilla. Useita kappaleita käsiteltäessä jokaiseen kappaleeseen ei riitä omaa lämpötila-anturia. Lämpötila nostetaan nopeudella 30-40 astetta tunnissa käsittelylämpötilaan 550-600 astetta. Kappaleita pidetään käsittelylämpötilassa noin 4-6 tuntia, jonka jälkeen lämpötilaa aletaan laskemaan 30-40 astetta tunnissa. Lämpötilan laskettua 200-300 asteeseen hallittu jäähdyttäminen lopetetaan ja kappaleiden annetaan jäähtyä vapaasti. Tilanteen mukaan uuni avataan tai annetaan jäähtyä suljettuna yön yli. Lämpökäsittelyä kyseisille kappaleille tekee useampi kuin yksi työntekijä.

### **Yhteenveto**

Arinat eivät suoruuodeltaan vastaa käsiteltävän kappaleen suoruusvaatimusta, joka saattaa aiheuttaa muodonmuutoksia. Kappaleiden määrät uunissa, käsittelyn kesto sekä loppujäähdytykset vaihtelevat käsittelyiden välillä tietyissä rajoissa. Käsittelyaika on reilusti pidempi, kuin tietoperustassa mainittu ”*tunti yhtä ainevahvuuden tuumaa kohden*” kyseisen kappaleen materiaalivahvuuden ollessa paksuimmillaan noin yhden tuuman.

## 4.3 Alihankkijan haastattelu: Koneistus

### **Haastattelun toteutus**

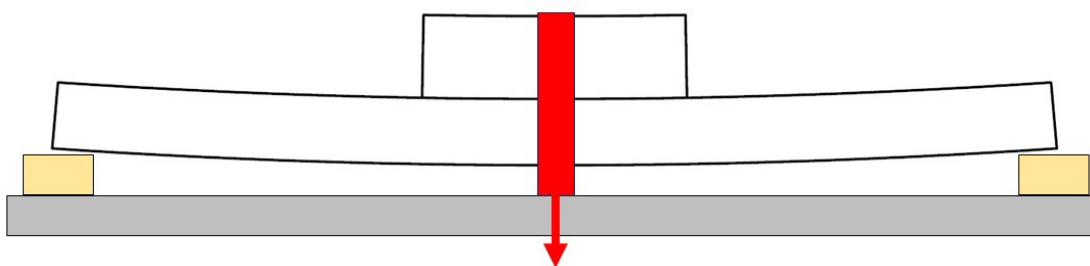
Haastattelu pohjautui liitteen 3 mukaiseen teemahaastattelun runkoon. Haastatte-

lussa ei käytetty nauhuria, vaan haastattelun edetessä tehtiin muistiinpanoja. Haastattelu tehtiin pienenä ryhmähaastatteluna, johon osallistui työssä tutkittavien osien koneistuksia pitkään tehnyt kokenut koneistaja sekä laatuasioista vastaava laatuinsinööri. Haastattelussa käsiteltiin teemahaastattelun rungon mukaiset kohdat. Näitä olivat koneistuskiinnitykset, kappaleen siirrot, työvaiheet ja olosuhteet.

Koneistuskiinnityksillä haluttiin selvittää, kuinka kappaleet on tuettu koneistuksen aikana ja vastaako tämä tilanne myöhemmin mittauksessa olevaa kiinnitystä. Mittaus-tapahtumasta poikkeava tilanne koneistuksen aikana saattaisi aiheuttaa muodonmuutoksia painovoiman aiheuttamien taipumien eli roikkuman takia. Kappaleen siirroissa tutustuttiin tarvittaviin siirtoihin ja mahdollisiin vaurioitumismahdollisuuksiin. Työmenetelmillä, vaiheilla ja niiden järjestyksellä on iso vaikutus koneistettavan kappaleen mittatarkkuuteen ja toistettavuuteen. Olosuhteet tarkoittavat ympäristöä, työvälineitä ja työntekijöitä. Haastattelun aineisto koostuu varsinaisen haastattelun lisäksi myöhemmin työn edetessä tehdyistä tarkentavista kysymyksistä.

### Haastattelun tulokset

Haastattelun avulla työn etenemisestä ja sen eri vaiheista koneistusalihaankkijalla saatiin hyvä käsitys. Ensimmäinen vaihe koneistusalihaankkijalla on kappaleen pohjamaalaaminen. Kappale kuljetetaan pohjamaalaukseen, jolloin se kiinnitetään kuljetusalustaan kuvion 20 mukaisesti. Kappaleen kummankin päädyn alle laitetaan puupalikat ja kappale kiristetään kiristysliinalla keskeltä riittävän kireälle.



Kuvio 20. Osan kiinnitys kuljetusalustaan ennen koneistusta

Pohjamaalauksen jälkeen kappaleet saapuvat koneistettaviksi. Kappaleet koneistetaan pääsääntöisesti samalla koneistuskeskuksella nimeltä A. Poikkeuksellisissa tapauksissa, kuten suuressa työkuormassa tai koneen A huollon aikana koneistukseen käytetään toista koneistuskeskusta nimeltä B. Viimeisen kerran näin on toimittu hieinan ennen opinnäytetyön alkamista, kun kappaleissa ilmeni toistuvasti toleranssiylityksiä. Pitkän aikavälin takia täyttä varmuutta ei kuitenkaan ollut kuuluiko mikään näistä toleransseja ylittäneistä kappaleista koneella B koneistettuihin kappaleisiin.

Kappaleen koneistuksessa on useita kiinnityksiä ja kääntöjä. Kappaleita valmistetaan yleensä neljän kappaleen sarjoissa. Niiden koneistus tehdään kiinnitys kerrallaan eli jokaiselle kappaleelle tehdään perän jälkeen sama työvaihe, jonka jälkeen siirrytään seuraavaan kiinnitykseen ja työvaiheeseen. Työn kannalta oleellisen johdepinnan koneistaminen tapahtuu näistä viimeisenä. Viimeisen vaiheen kiinnitykseen käytetään aina samaa jigiä ja kappale asetetaan koneeseen aina samalla tavalla. Tämän johdepinnan koneistamiseen kuulu rouhintavaihe vuorotellen jokaiselle kappaleelle, jonka jälkeen tehdään viimeistelyvaihe. Viimeistelyvaiheessa pinnasta poistetaan enää vähän materiaalia, jolla pyritään minimoimaan jäännösjännityksistä ja työstövoimista aiheutuvat muodonmuutokset. Viimeistelyn jälkeen jokaisesta kappaleesta tehdään mittausraportti työstökoneessa olevan digitaalisen kosketusanturin avulla. Mittausvaihe suoritetaan, kun kappaleiden viimeistelykoneistus on tehty, kappale on löysätty ja kiristetty uudelleen jigiin sekä koneistuksen aikaiset palkin päädyissä olevat värähtelytuet on poistettu. Mittaaminen työstökoneella on osa laaduntarkkailua, jolla pyritään havaitsemaan mahdolliset kappaleille koneistuksen aikana tapahtuneet muodonmuutokset. Lopullinen tarkastusmittaus tapahtuu vasta kokoonpanossa.

Mittaamisen jälkeen hyväksytty kappale nostetaan erilliseen kuljetustelineeseen nostamiseen tarkoitetuista kierrereistä. Kappaleen pohjassa olevat reiät asettuvat kuljetustelineessä oleviin tappeihin ja kiinnitys tapahtuu teräsvyöllä kappaleen keskivaiheilta. Kappaleen ulkonevaa osaa tuetaan kuljetustelineen ja kappaleen väliin pakotettavilla kuminpalasilla. Kuljetustelineen ulkomitat ovat kuljetettavaa kappaletta suuremmat ja se muodostaa suojaavan häkin kappaleen ympärille. Ennen opinnäytetyön alkua käytäntö kuljetuksen suhteen oli kuitenkin erilainen. Silloin kappaleet kul-

jetettiin kuormalavoihin kiinnitettyinä, vaikka kuljetustelineet olivat olemassa. Useiden toleranssiylityksien jälkeen kuljetustelineet oli otettu uudelleen käyttöön. Koneistusalihankkijalta kappaleet kuljetetaan toimeksiantajalle pintakäsittelyyn ja kokoonpanoon.

### **Yhteenveto**

Kappaleen kiinnitys koneistusalihankkijan ja pohjamaalauksen välisessä kuljetuksessa aiheuttaa kappaleeseen jännityksiä ja taipumaa suunnassa, jossa toleranssiylityksiä oli toistuvasti havaittu. Ennen tätä kappaleelle on tehty jännitystenpoistohehkutus, jossa pyritään poistamaan rakenteen sisäiset jännitykset. Riittävän suurella kiristysvoimalla kuljetuksen aikainen kiinnitys saattaa aiheuttaa myötörajan ylittäviä jännityksiä, joista syntyy rakenteeseen sisäisiä jännityksiä. Tästä syystä rakenteen lujuudelle päätettiin tehdä analyysi elementtimenetelmällä, jolla saatiin käsitys, kuinka suuri voima myötörajan ylittämiseen vaadittiin.

Työstökoneella mittaamista ei pidetä luotettavana keinona, koska työstökoneen mahdolliset epätarkkuudet ja virheet koneen geometriassa eivät tule ilmi koneella itsellään työstetyn kappaleen mittaamisessa koneistamista vastaavassa kiinnityksessä. Kyseisellä kappaleella on kuitenkin taipumus koneistuksen aikaisiin muodonmuutoksiin, jolloin mittaamista työstökoneella voidaan pitää perusteltuna. Tällöin mittaamisella voidaan havaita työstötapahtuman aikana syntyneet muodonmuutokset ja virheet. Työstökoneella tehtävä suoruuden mittaus antaa tuloksena mitatun viivan suoruuden työstökoneen geometrian suoruuteen nähden. Tämän kappaleen tapauksessa tarkkuudesta varmistutaan tekemällä asian mukaiset mittaukset kokoonpanovaiheessa laserinterferometrillä. Työstökoneen suoruudesta voisi saada varmuuden suorittamalla luvussa 3.4.5 esitetyn virheen eliminoinnin 180°:n käännöllä koneistettua kappaletta hyödyntäen liitteessä 9 esitetyn periaatteen mukaisesti.

Valmiiden kappaleiden kuljetus koneistusalihankkijalta pintakäsittelyyn ja kokoonpanoon tapahtui opinnäytetyön aikana kuljetustelineissä. Ennen opinnäytetyön aloittamista kuljetuksen aikainen kiinnitys kuormalavoihin saattoi aiheuttaa kappaleisiin taipumaa ja jännitystiloja. Kuljetuksen aikana kappaleet olivat kuormalavoilla samassa



asennossa, kuin pohjamaalaukseen kuljetettaessa kuviossa 20, mutta tässä tapauksessa kuormalavoja oli kappaleiden alla koko matkalla. Myös tähän tilanteeseen hyödynnettiin elementtimenetelmää, selvittäen kuinka suuri muodonmuutos vastaa myötörajan suuruisia jännityksiä.

#### 4.4 Pintakäsittely ja mittaus kokoonpanossa

Kappaleelle tehdään tarvittavat pintakäsittelyt ja mittaukset toimeksiantajayrityksen tiloissa, jonka jälkeen kappale on valmis kokoonpanovaiheeseen. Pintakäsittelyn vaiheisiin ei tämän työn aikana tutustuttu, kuin perusasioiden osalta. Mittauksen osalta tehtiin teemahaastattelu.

##### **Pintakäsittely**

Ennen mittauksia koneistusalihaankkijalta tullut kappale pintakäsittelään. Pintakäsittelyyn kuuluvat seuraavat vaiheet: kittaus, pohjamaalaus, kuivaus, maalaus päävärillä ja kuivaus. Kittauksessa eli ”pakkeloinnissa” epätasaisuudet, kuten hitsisaumat, tasoitetaan jouheviksi tasoitteen avulla. Kittauksen jälkeen kappaleet maalataan hiontapohjamaalilla. Hiontapohjamaali peittää kittauksessa syntyneitä huokosia ja epätasaisuuksia. Maalattu kappale viedään kuivatusuuniin, jossa puhaltimet puhaltavat noin 60 °C ilmaa. Kuivausvaihe kestää noin 1 h. Hiontapohjamaalilla maalatulle kappaleelle tehdään tarvittavat viimeistelyt, jonka jälkeen se maalataan lopulliseen väriinsä. Lopulliseen väriin maalattu kappale viedään taas kuivatusuuniin, johon puhaltimet puhaltavat 60 °C ilmaa. Tämä kuivausvaihe kestää noin 1,5 h.

##### **Haastattelun toteutus**

Mittaustapahtumaa käytiin seuraamassa ja mittauksia suorittaneelle kokoonpanijalle tehtiin haastattelu liitteen 4 teemahaastattelun rungon mukaisesti. Haastattelua ei nauhoitettu, vaan haastattelun jälkeen tehtiin muistiinpanot. Haastattelun lisäksi mittauksista seurattiin pyrittäen löytämään vastauksia teemahaastattelun rungossa oleviin kysymyksiin ja aiheisiin. Nämä aiheet olivat mittauksen aikainen kiinnitys, ympäristön olosuhteet, mittauksen vaikutus ja mittaukseen käytetyt välineet.

### Haastattelun tulokset

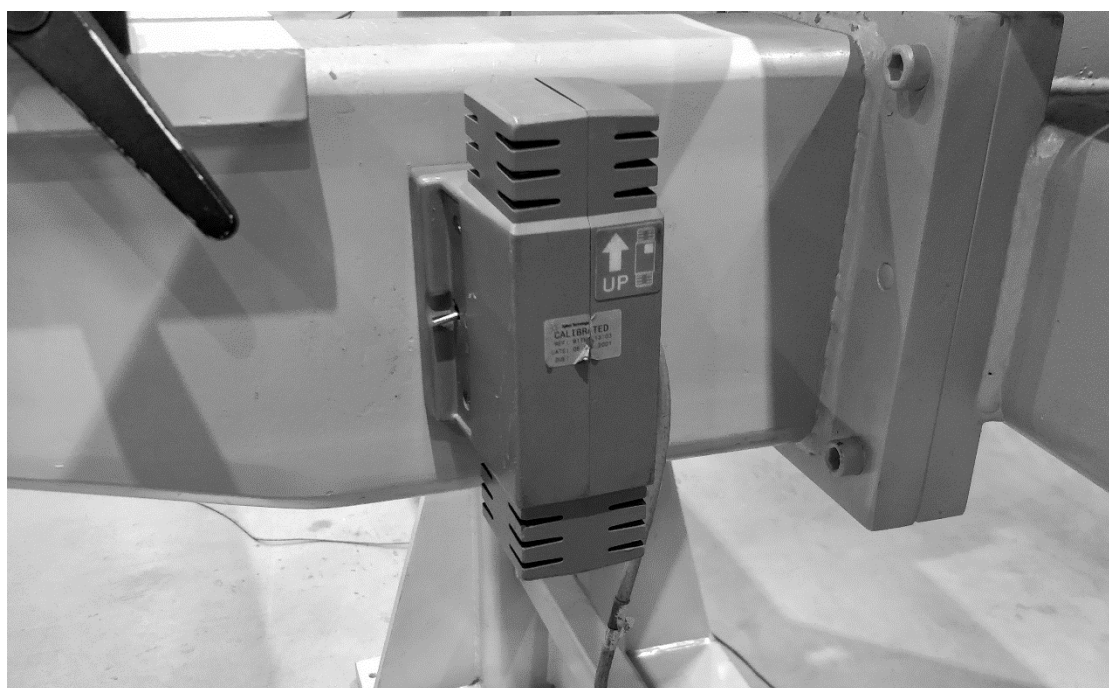
Kappaleesta mitataan johdekelkan kulkulinjan suoruus kahdessa eri tasossa. Ennen mittausta pintakäsitelty kappale kiinnitetään jigiin. Kappale kiinnitetään jigiin samaan asentoon ja samoista kohdista, joista se kiinnitettiin koneistuksen aikana. Vastaavia jigejä on kokoonpanossa useita. Suoruus mitataan kulmamittaukseen perustuen laserinterferometrillä. Ennen mittausta johteiden asennuspinnat puhdistetaan ja johteet asennetaan kappaleeseen. Johteelle asennetaan johdekelkat, joihin taas kiinnitetään mittaukseen käytettävän palautuspeilin kiinnityskappale ja itse palautuspeili (ks. kuvio 21). Laserinterferometrin ja palautuspeilin välissä oleva kulmainterferometri on tuettu kiinteästi mitattavaan kappaleeseen ja se pysyy paikallaan mittauksen aikana. Mittauksessa käytetään uutta johdetta ja johdekelkkoja, jotka jäävät mittauksen jälkeen kiinni kappaleeseen.



Kuvio 21. Johdekelkkojen kulkulinjan suoruuden mittaus

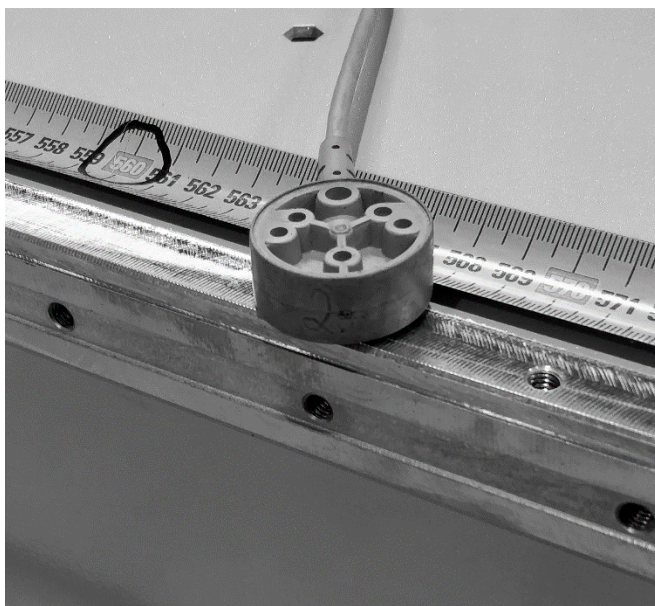
Mittaaminen tapahtuu siirtämällä johdekelkkoihin kiinnitettyä palautuspeiliä johdetta pitkin 200 mm kerrallaan siirtyen kappaleen päästä toiseen. Kulmapoikkeaman arvo tallennetaan aina 200 mm välein nappia painamalla laserinterferometriin kytkettyyn tietokoneeseen ja siirrytään 200 mm seuraavaan tallennuskohtaan. Siirrettävän johdekelkkapaketin pituus vastaa siirrytyn 200 mm matkaa. Laserinterferometriin kytketty tietokone laskee suoruusvirheen palautuspeilin kulmamutoksen ja kuljetun matkan perusteella. Haastattelun yhteydessä mittauksen toistuvuutta testattiin toistamalla sama mittaus heti uudelleen. Näiden kahden mittauksen suurimpien suoruusvirheiden ero oli noin 0,01 mm.

Mittauspaikan sijainti on suhteellisen kaukana ulko-ovista, jolloin nopeat lämpötilan muutoksien eivät vaikuta mittaustuloksiin. Lämpötila, ilmankosteus ja ilmanpaine mitataan laserinterferometrin ulkoisella olosuhdeanturilla ja kompensoidaan reaaliaikaisesti. Olosuhdeanturi sijoitetaan mittauksen ajaksi mitattavan kappaleen keskelle sen alapuolelle (ks. kuvio 22).



Kuvio 22. Laserinterferometrin olosuhdeanturi

Mittattavaan kappaleeseen kiinnitetään lämpötila-anturi mittauksen ajaksi (ks. kuvio 23).



Kuvio 23. Kappaleeseen kiinnitetty lämpötila-anturi

### **Yhteenveto**

Maalin kuivattamiseen käytetyn 60 °C lämpötilan ei uskota aiheuttavan muutoksia materiaaliin. Nopea lämpötilan nosto aiheuttaa rakenteeseen jännitystiloja, joiden suuruuksia ja vaikutuksia ei tiedetä. Myöskään muiden pintakäsittelyssä tehtyjen vaiheiden vaikutuksista kappaleen rakenteeseen ei ole tietoa. Koneistusalihankkijan mittaustulosten perusteella kappaleet ovat toleranssien sisällä, mutta kokoonpanovaiheessa toleranssit ylittyvät. Näiden mittausten välillä on kuljetus alihankkijalta kokoonpanoon ja kokoonpanossa tehtävä pintakäsittely. Pintakäsittelyn vaikutuksien selvittämiseksi päätettiin lisätä ylimääräinen mittaus koneistuksesta saapuneille kappaleilla ennen niiden pintakäsittelyä. Mittauksen avulla oli mahdollisuus päästä jäljille, aiheuttiko pintakäsittely kappaleeseen muodonmuutoksia. Näiden mittausten avulla oli mahdollista myös selvittää, onko kappale toleranssien sisällä saapuessaan kokoonpanoon. Oli myös huomattava, että mittaukset tehtiin eri olosuhteissa eri välineillä. Mittaustuloksia käsitellään luvussa 4.6.

## 4.5 Ulkopuolisten asiantuntijoiden haastattelut

Ulkopuoliset asiantuntijat eivät ole tekemisissä työssä tutkittavan kappaleen kanssa. Ulkopuolisten asiantuntijoiden haastattelussa käytettiin liitteiden 1-4 teemahaastattelun runkoja jokaisesta eri työvaiheesta. Haastattelut painottuivat asiantuntijoiden osaamisalueisiin.

### 4.5.1 Asiantuntija 1

Asiantuntija 1 on akkreditoitun kalibroitilaboratorion laboratorioinsinööri. Haastattelun ohessa tutustuin suoruuden mittaamiseen laserinterferometrillä sekä teimmellä käytännöntestejä. Haastatteluun ei käytetty nauhoitusta, vaan haastattelun aikana tehtiin muistiinpanoja.

Käytännöntesteissä testattiin eri tekijöiden vaikutuksia mittaustuloksiin. Näitä olivat laserinterferometrin aseman poikkeutus kesken mittauksen, lämpötila-arvojen muutokset, palautuspeilin liikkuminen sekä useiden mittausten toistotarkkuus.

#### **Käytännön testit**

Interferometrin liikuttelun ei vaikuttanut mittaustulokseen, kunhan palaavan lasersäteen määrä pysyi riittävän suurena. Jos laitetta siirsi niin paljon, ettei säde osunut paluureikään joutui mittaamisen aloittamaan uudelleen. Lämpötila-arvoja muutettiin lämmittämällä kappaleen lämpötilaa mittaavaa johdollista anturia käsissä. Useiden asteiden nopea lämmittäminen ei kuitenkaan vaikuttanut mittaustuloksiin oleellisesti. Syy tähän oli selvä: lämpötilan tarkka mittaaminen on oleellista pituudenmittaamisessa, jossa mitattavan kappaleen lämpötilakertoimen avulla korjataan lämpötilaerosta aiheutuva virhe. Mitattaessa suoruutta kulmamittauksella ei lämpötilalla ole niin suurta merkitystä. Toistotesteissä perättäisten mittausten mittaustulokset erosivat alle 0,01 mm toisistaan. Testissä suoruutta mitattiin noin 1000 mm pituisesta mittalaitteesta.

Palautuspeilin sekä interferometrin liikuttaminen sen sijaan vaikutti oleellisesti mitaustuloksiin. Kohtisuorat liikkeet eivät vaikuttaneet mittaustuloksiin, mutta kulman muuttaminen vaikutti.

### **Haastattelun tulokset**

Keskeiseksi asiaksi haastattelussa nousi kappaleen koneistukseen käytettävän työstökoneen mekaaninen tarkkuus. Työstökoneen mekaaninen tarkkuus on oltava vähintään kappaleen vaatimien toleranssien tasolla. Mittaamisessa oleellisinta on palautuspeilin sekä kulmainterferometrin tarpeettomien kulmamuuutoksien välttäminen. Hitsauksen ja lämpökäsittelyn ei nähty vaikuttavan toleranssiylityksiin. Pintakäsittelyssä käytetyn kuivauslämpötilan vaikutusta kappaleen muotoon pidettiin epätodennäköisenä.

### **Yhteenveto**

Kulmainterferometrin ja palautuspeilin kulmissa tapahtuvat tarpeettomat muutokset vaikuttavat suoraan mittaustuloksiin. Työstökoneen mekaanisesta tarkkuudesta tulisi varmistua.

#### **4.5.2 Asiantuntija 2**

Haastateltu asiantuntija on suuren kotimaisen teollisuusyrityksen Jyväskylän yksikön valmistuksen kehityspäällikkö. Haastattelussa käytiin läpi kaikki eri teemahaastattelun rungot, jotka on esitetty liitteissä 1-4. Haastattelun nahoittamiseen käytettiin digitaalista ääninauhuria, jolloin haastatteluun pystyi palaamaan myöhemmin. Haastattelulle tehtiin litterointi, sisältö lajiteltiin valmistusmenetelmien mukaan ja tulkitsemalla poimittiin keskeiset asiat.

### **Haastattelun tulokset**

Haastattelussa korostui aihoiden laadun ja mittatarkkuuden merkitys tarkkamittaisia kappaleita hitsauksessa. Heitot ja epätarkkuudet aihioissa aiheuttavat hitsausjännitysten takia huomattavia muodonmuutoksia kappaleeseen. Erityisesti rakoja hitsattavien kappaleiden välillä tulisi välttää.

Lämpökäsittelyssä vierekkäiset massaltaan suuresti eroavat kappaleet vaikuttavat toistensa lämpötilojen muutosnopeuksiin ja sitä kautta lämpökäsittelyn parametreihin.

Koneistuksessa mittatarkkojen pintojen koneistus on suositeltavaa tehdä lopullisessa käyttöasennossa sekä sitä vastaavalla kiinnityksellä ilman tuentoja. Tällä saadaan mahdolliset joustot hallintaan. Tilan, koneen sekä kappaleen lämpötila tulee olla mahdollisimman tasainen koneistustapahtuman ajan. Työstökoneeseen kohdistuvat lämpötilan muutokset voi saada hallintaan estämällä kylmien ilmavirtojen pääsyä työstökoneen rakenteisiin. Nostot tulisi tapahtua lopullisista kiinnityspisteistä, jolloin rakenteeseen ei kohdistettaisi erilaisia jännitystiloja.

Maalin kuivattaminen kokoonpanossa 60 °C ei pitäisi vaikuttaa rakenteeseen, koska lämpötila on suhteellisen alhainen.

Jokaisessa valmistusvaiheessa kaikki mahdollinen tulisi pysyä muuttumattomana. Jos missään vaiheessa tapahtuu muutoksia eri kappaleiden välillä, menetetään mahdollisuus jäljittää aiheuttaja. Muuttujien poistaminen olisi ensiarvoisen tärkeää.

### **Yhteenveto**

Muuttujien poistaminen eri työvaiheista on tärkeää laatuongelmaa ratkaistaessa. Koneistuksen tulisi vastata lopullista käyttöasentoa eli tässä tapauksessa mitta-asentoa. Koneistettaessa tarkkoja kappaleita nopeat lämpötilanvaihtelut aiheuttavat huomattavia virheitä. Lämpötilan muutoksia pystyy vähentämään estämällä ilmavirtojen pääsyä työstökoneelle. Hitsauksessa aihoiden mittatarkkuuteen tulisi kiinnittää huomiota.

## **4.6 Mittaustulosten keräys ja analysointi**

Tässä luvussa käydään läpi tilastollisilla menetelmillä tehtyjä analyyssejä ja tarkasteluja.

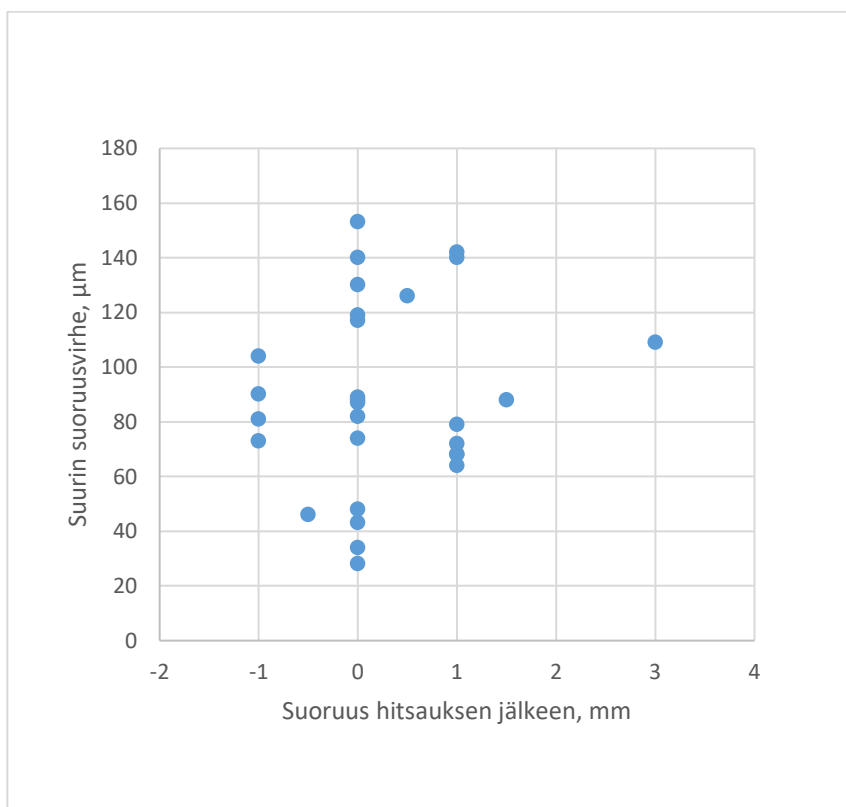
#### 4.6.1 Hitsaus

Hitsattujen kappaleiden hitsauksen jälkeinen suoruus mitataan jokaisesta kappaleesta linjalangan avulla viidestä eri pisteestä XY- ja YZ-tasoissa. Mittauksen tulokset kirjataan käsin mittauspöytäkirjaan, josta ilmenee mittaustuloksen lisäksi mitatun kappaleen sarjanumero sekä mittauksen suorittaja. Myös kappaleen hitsaaja käy ilmi, koska sama henkilö suorittaa mittauksen. Mittauspöytäkirjat saatiin käyttöön tilastolistien analyysien tekemiseksi.

##### **Suoruus**

Kappaleiden hitsauksen jälkeistä suoruutta päätettiin verrata kokoonpanon mittaus-tuloksiin. Vertailu päätettiin tehdä luomalla tuloksista hajontakuvaaja ja laskemalla arvoista korrelaatiokerroin. Näiden tekemiseen käytettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmistoa. Kun käsitellään kahta muuttujaa, joista toinen on tekijä ja toinen laatuominaisuus, sijoitetaan hajontakuvaajassa tekijä vaaka-akselille ja laatuominaisuus pysty-akselille (Kume 1998, 28-29). Hitsauksen yhteydessä tehdyistä suoruusmittauksista analyysiin valittiin XY-tasossa tehdyn suoruusmittauksen suurin lukema. Kokoonpanon mittauksista käytettiin suurinta suoruusvirhettä. Hajontakuvaaja esitetty kuviossa 24.





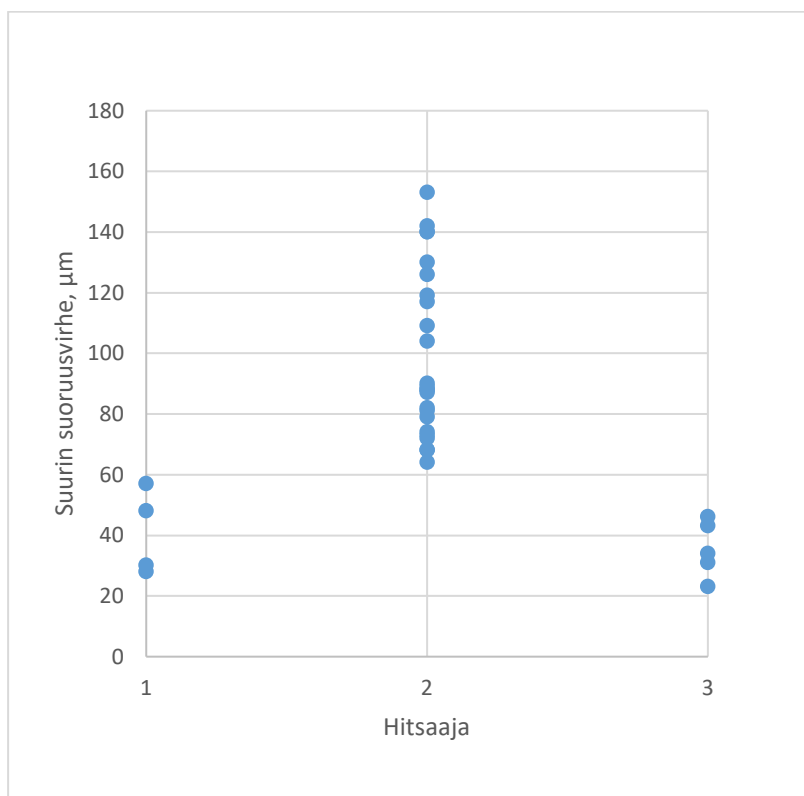
Kuvio 24. Hitsauksen jälkeisen suoruuden ja suurimman kokoonpanossa mitatun suuruusvirheen hajontakuvi

Suoruuden mittaukset eivät hajontakuviassa osoittaneet yhteyttä kokoonpanon mittauksiin. Hajontakuviota lisäksi samojen tekijöiden suhteelle laskettiin korrelaatiokerroin excel-tilukkolaskentaohjelmiston valmiilla funktiolla. Korrelaatiokertoimeksi tuli 0,14. Korrelaatiokertoimen ollessa noin 0,6 kyseessä saattaisi olla positiivinen korrelaatio (Kume 1998, 28-29). 0,14 suuruisen korrelaatiokertoimen perusteella muuttujien välillä ei ole riippuvuussuhdetta.

### Hitsaaja

Kappaleen hitsauksen tehneen henkilön vaikutusta kokoonpanossa mitattuihin suoruuden virheisiin päätettiin tutkia.

Tässä päädyttiin käyttämään regressioanalyysia. Hitsaajan nimen lisäämistä vaikeutti, että osaan mittauspöytäkirjoja nimeä ei ollut kirjoitettu. Mittauspöytäkirjan tekijän pystyi onneksi päättämään vertaamalla selkeästi toisistaan eroavia käsialoja keskenään. Regressioanalyysi esitetty kuviossa 25.



Kuvio 25. Suurimman suoruusvirheen ja hitsaajan välinen regressioanalyysi

Käytettävissä olleiden mittauspöytäkirjojen perusteella hitsaajalla on selkeä yhteys kokoonpanossa mitattujen suoruusvirheiden suuruuteen. Kaikki suurimmat heitot osuivat hitsaajalle 2, kun hitsaajan 1 ja 3 hitsaamissa kappaleissa havaitut heitot olivat pieniä.

#### 4.6.2 Koneistus

##### **Lämpötilamuutokset koneistuksessa**

Kuten aiemmin tietoperustassa todettiin, lämpötilan muutokset aiheuttavat hallitsemattomia muodonmuutoksia koneistettavaan kappaleeseen. Lämpötilan seuraamista koneistettavista kappaleista ei kuitenkaan tämän työn aikana toteutettu. Toleranssiylityksien syntyemisestä koneistusvaiheessa olisi pitänyt olla vahva epäily, koska

lämpötilan mittaaminen olisi aiheuttanut huomattavaa lisätyötä koneistuksesta vastaavalle alihankkijalle.

### Koneistuksen mittapöytäkirjat

Koneistuksessa jokaisesta kappaleesta tehdään mittauspöytäkirja, joka toimitetaan kappaleen mukana kokoonpanoon. Nämä mittauspöytäkirjat kuitenkin hävitetään kokoonpanossa tehtyjen mittausten jälkeen. Eräs koneistuksen mittauspöytäkirja esitetty kuviossa 26. Koneistuksessa tehdyssä mittapöytäkirjassa tulokset ovat koneistusalihankkijan haastatteluun viitaten noin 0,02 mm vaihteluvälin sisällä. Kokoonpanon mittaustuloksiin verrattaessa näiden tulosten välillä on huomattava ero, jolloin mahdollista riippuvuussuhdetta niiden välillä voi pitää epätodennäköisenä.

NR	PAIKKA	MITTAUS
0	2920	0.2271
1	2336	0.2238
2	1752	0.222
3	1168	0.2237
4	584	0.2203
5	0	0.224
6	-584	0.2192
7	-1168	0.2235
8	-1752	0.2232
9	-2336	0.2165
10	-2920	0.2201

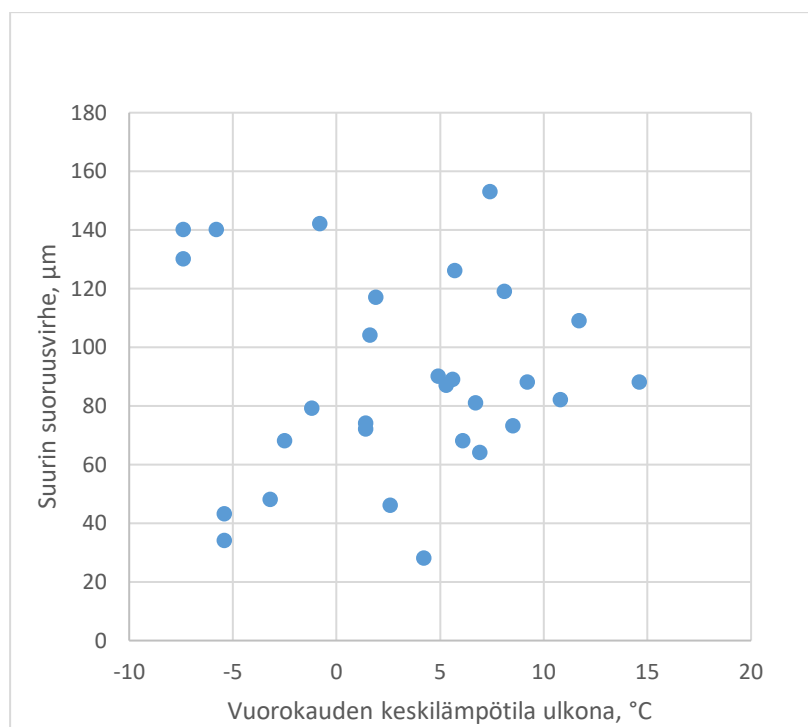
Kuvio 26. Koneistuksessa laadittu mittauspöytäkirja

### 4.6.3 Mittaaminen kokoonpanossa

Jokaisen koneen mittauksesta tallennetaan sähköinen mittauspöytäkirja. Näitä mittauspöytäkirjoja pystytään käyttämään analysoinneissa. Mittaus tehdään normaalisti maalausvaiheen jälkeen, kun kappale on saapunut kokoonpanoon. Haastattelujen sekä tietoperustan pohjalta päätettiin osaan kappaleista tehdä mittaus ennen pintakäsittelyä.

## Ulkolämpötila

Ulkolämpötilan ja suurimman suoruusheiton välistä suhdetta haluttiin selvittää lämpötilan ollessa yleinen tekijä hallitsemattomien muodonmuutosten synnyssä. Suhdetta päätettiin selvittää hajontakuvaajan ja korrelaatiokertoimen avulla. Ulkolämpötilana käytettiin ilmatieteen laitoksen sääasemien arkistosta löytyviä sääasemakohtaisia vuorokauden keskilämpötiloja (Ilmatieteen laitoksen sääasemien arkisto). Suurimmat heitot suoruudessa saatiin kokoonpanon mittapöytäkirjoista, joista ilmenee myös mm. päivämäärät ja sarjanumerot. Hajontakuvaaja esitetään kuviossa 27.



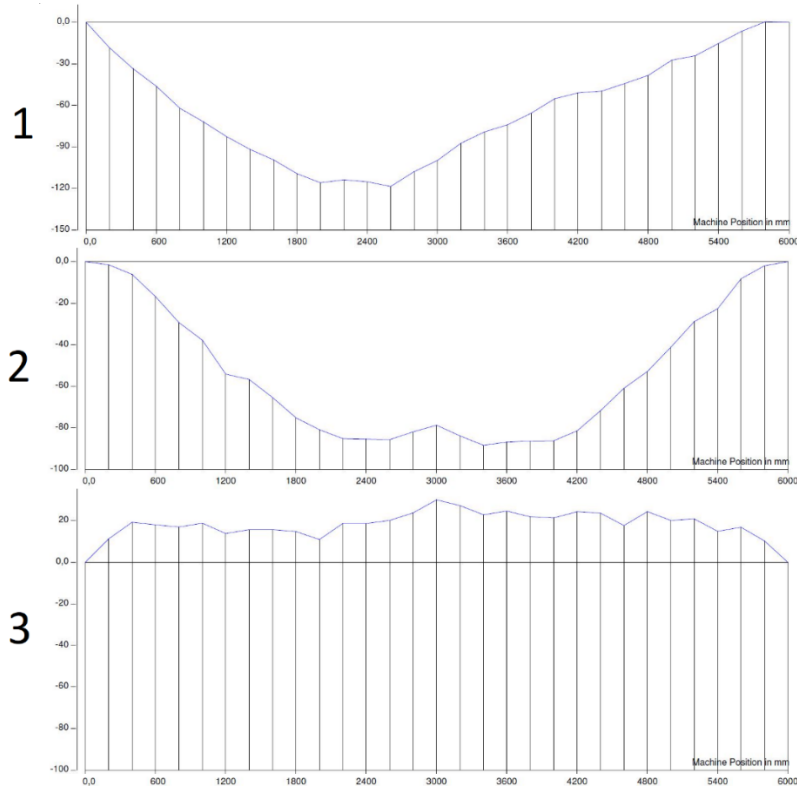
Kuvio 27. Suurimman suoruusvirheen ja ulkolämpötilan hajontakuvaaja

Hajontakuvaajasta ei pysty havaitsemaan korrelaatiota ulkolämpötilan ja suurimman heiton välillä. Korrelaationkerroin oli pyöristettynä -0,009. Korrelaationkertoimen perusteella muuttujien välillä ei ole riippuvuussuhdetta.

## Suoruskäyrän muoto

Suoruskäyrällä tarkoitetaan suoruuden mittauksesta muodostuvaa suoruuden muo-

toa kuvaavaa käyrää. Näissä käyrissä havaittiin toistuvasti muutamia eri muotoja. Selkeästi erilaisia muotoja oli yhteensä 3. Nämä muodot nimettiin numeroilla 1, 2 ja 3, jonka jälkeen numerot sijoitettiin muiden mittaustulosten kanssa sarjanumeron mukaisesti taulukkoon. Muodot ja niiden numeroinnit on esitetty kuviossa 28.



Kuvio 28. Suoruskäyrien erilaiset muodot

Muotojen ja suurimpien suoruvirheiden suhdetta päätettiin selvittää regressioanalyysillä (ks. kuvio 29).

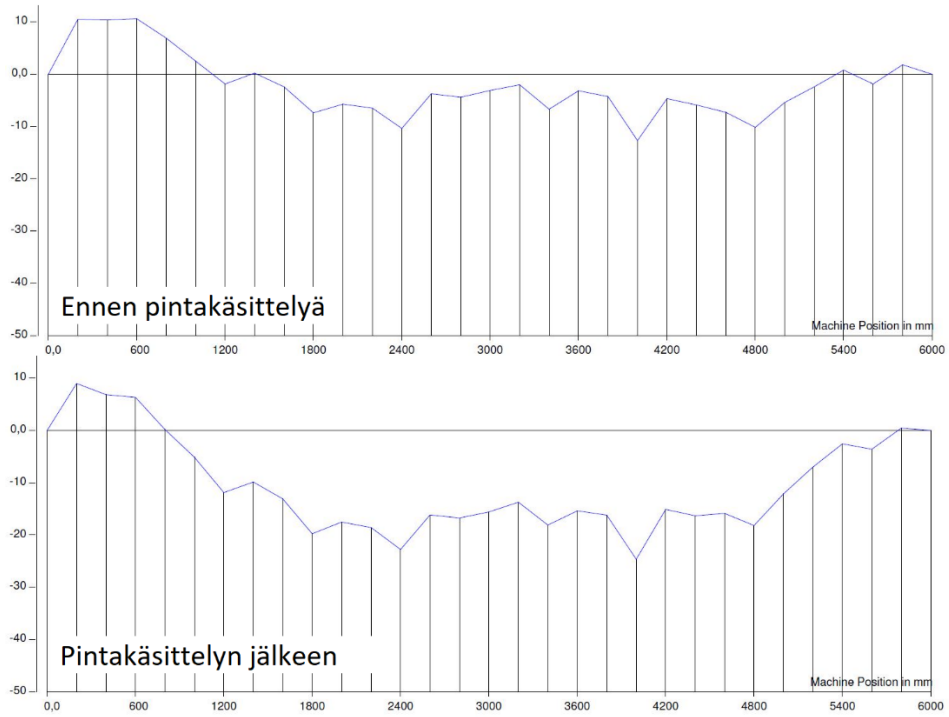


Kuvio 29. Suoruskäyrän muodon ja suurimman suoruuksvirheen regressioanalyysi

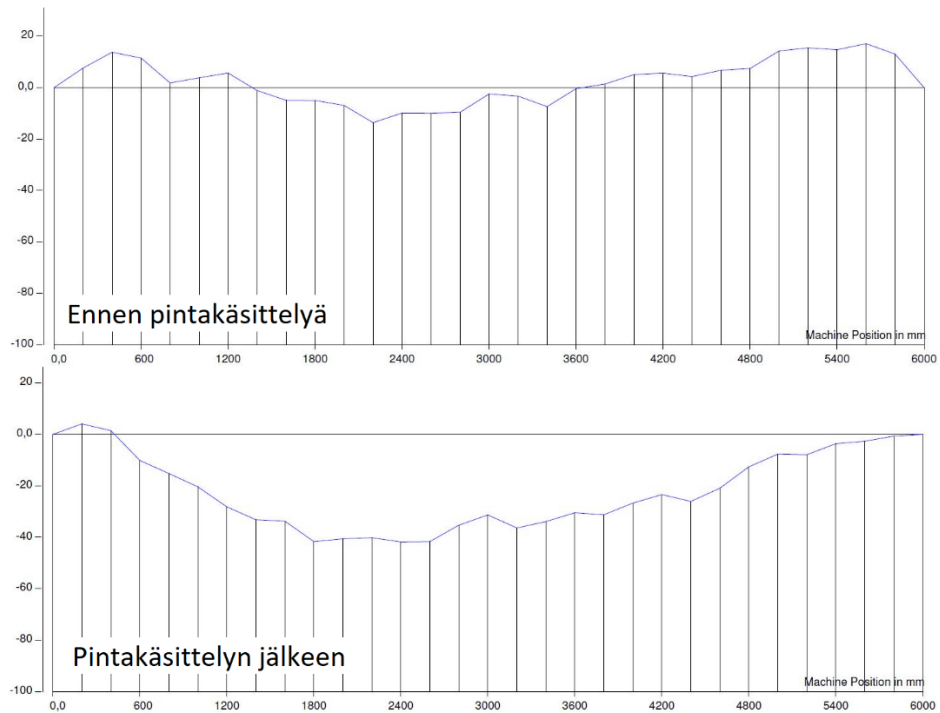
Suoruskäyrän muodon ja suurimman suoruuksvirheen välillä ei havaita riippuvuussuhdetta. Analyysiin ei tullut mukaan yhtäkään muodon 3 mukaista suoruuksvirhettä, koska muotoa 3 havaittiin vain ennen pintakäsittelyä tehdyissä suoruuksmittauksissa.

### **Pintakäsittelyn vaikutus**

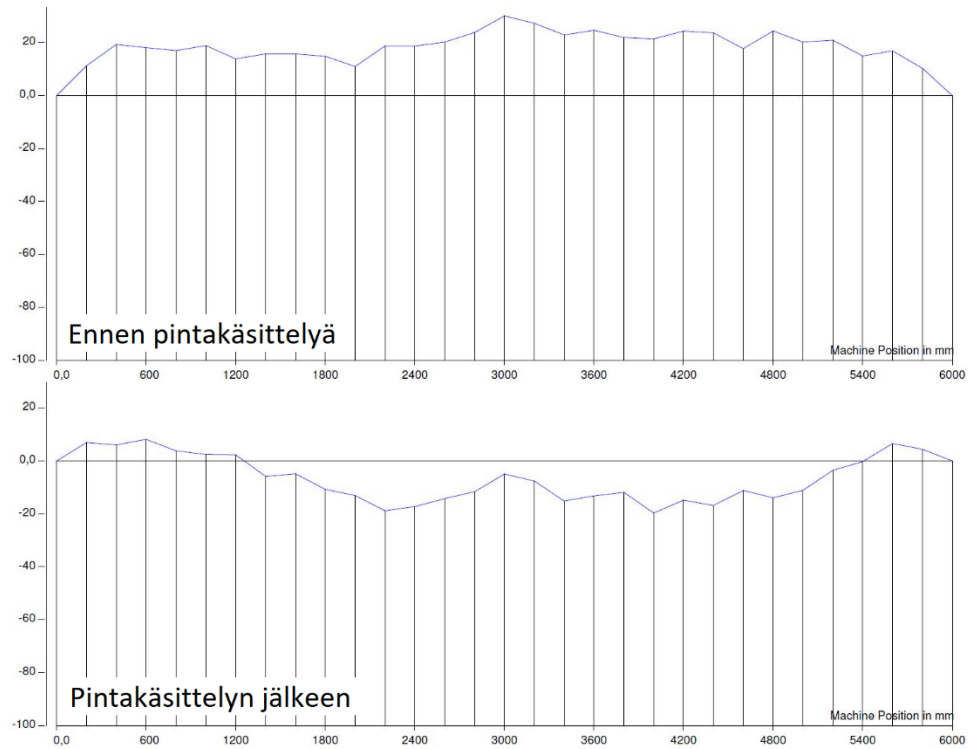
Pintakäsittelyn vaikutusta tutkittiin tekemällä suoruuksmittaus ennen pintakäsittelyä ja sen jälkeen. Näiden mittausten avulla yritettiin selvittää mahdollisia pintakäsittelyssä tapahtuvia muodonmuutoksia. Työn aikana mittaustulokset ennen ja jälkeen pintakäsittelyä saatiin yhteensä 4 eri kappaleesta. Kappaleille on keksitty kuvitteelliset sarjanumerot: 10, 20, 30 ja 40. Kappaleiden suoruskäyrät ennen ja jälkeen pintakäsittelyä on esitetty seuraavissa kuviossa 30-33.



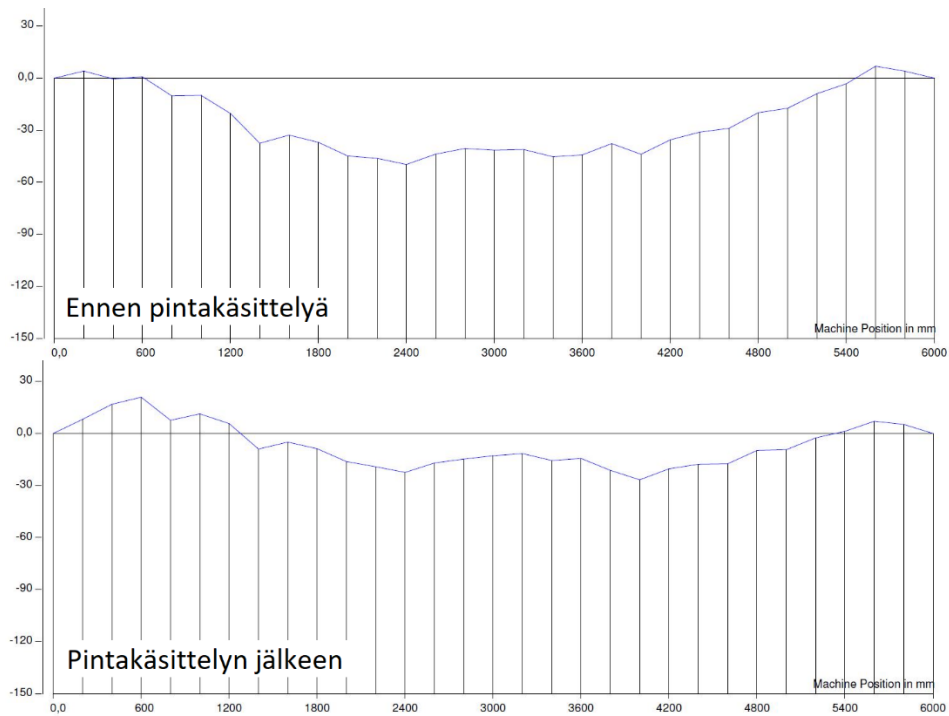
Kuvio 30. Kappaleen 10 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn



Kuvio 31. Kappaleen 20 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn



Kuvio 32. Kappaleen 30 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn



Kuvio 33. Kappaleen 40 suoruus ennen ja jälkeen pintakäsittelyn



Ennen pintakäsittelyä tehdyssä mittauksessa jokaisen kappale suoruuskäyrä poikkeaa hieman toisistaan. Kappaleissa 10, 20 ja 30 havaitaan suoruuskäyrän siirtyminen kuviossa alaspäin, kun taas kappaleessa 40 siirtymä on ylöspäin. Näiden mittaustulosten perusteella ei voi todeta tiettyä sääntöä pintakäsittelyn vaikutuksesta suoruteen. Mittaukset kuitenkin osoittavat, että pintakäsittelyllä on vaikutusta kappaleen muotoon.

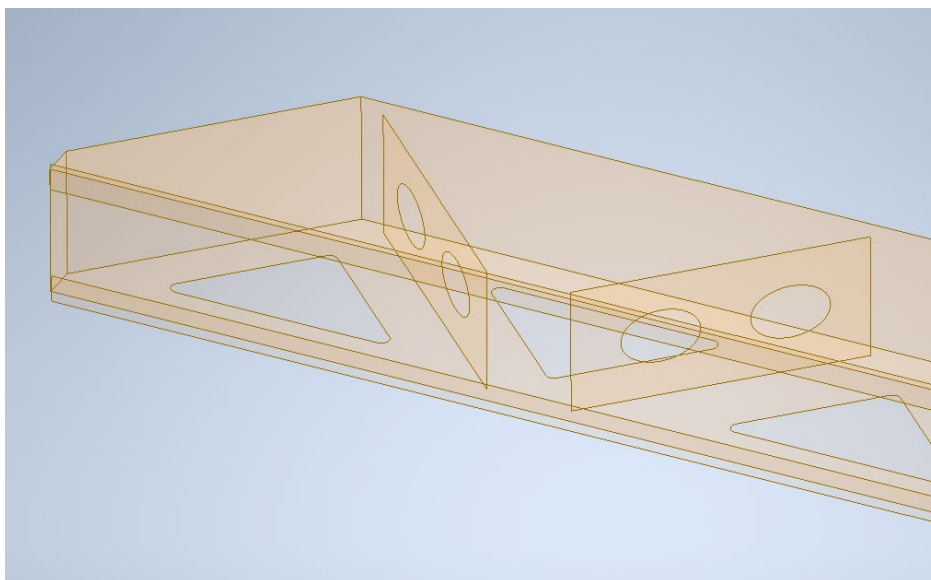
Ennen pintakäsittelyä tehdyistä mittauksista voidaan todeta koneistukseen käytetyn työstökoneen mekaanisen tarkkuuden riittävän kappaleelta vaadittuun tasomaisuustoleranssiin.

#### 4.7 Analyysit elementtimenetelmällä

Analyysit elementtimenetelmällä päätettiin ottaa avuksi toleranssiylityksien syiden etsinnässä. Tietokoneavusteisella analyysillä pystyi suhteellisen pienellä työllä selvittämään eri tilanteiden vaikutusta rakenteeseen. Analyysilla päädyttiin tutkimaan kahta eri tilannetta: kuljetuksen aikaista kiinnitystä ja koneistuksen jälkeistä kappaleen nostoa. Taipumien ja jännityksien selvittämisen olisi voinut tehdä myös lujuusopin laskukaavojen avulla kynällä ja paperilla. Tietokoneavusteinen analyysi on kuitenkin huomattavasti tarkempi ja sen käyttö oli perusteltua näin monimutkaisessa rakenteessa. Käsien lasketut tulokset voisivat toimia vertailukohta tietokoneella tehdyille analyysille, jos kyseessä olisi ollut puhtaasti lujuuslaskentatapaus ja tuloksien oikeellisuudesta olisi haluttu varmistua. Tässä työssä elementtimenetelmää käytettiin muun tutkimustyön apuvälineenä, joten analyyttisten menetelmien käytölle ei nähty tarvetta.

#### 4.7.1 Valmistelut

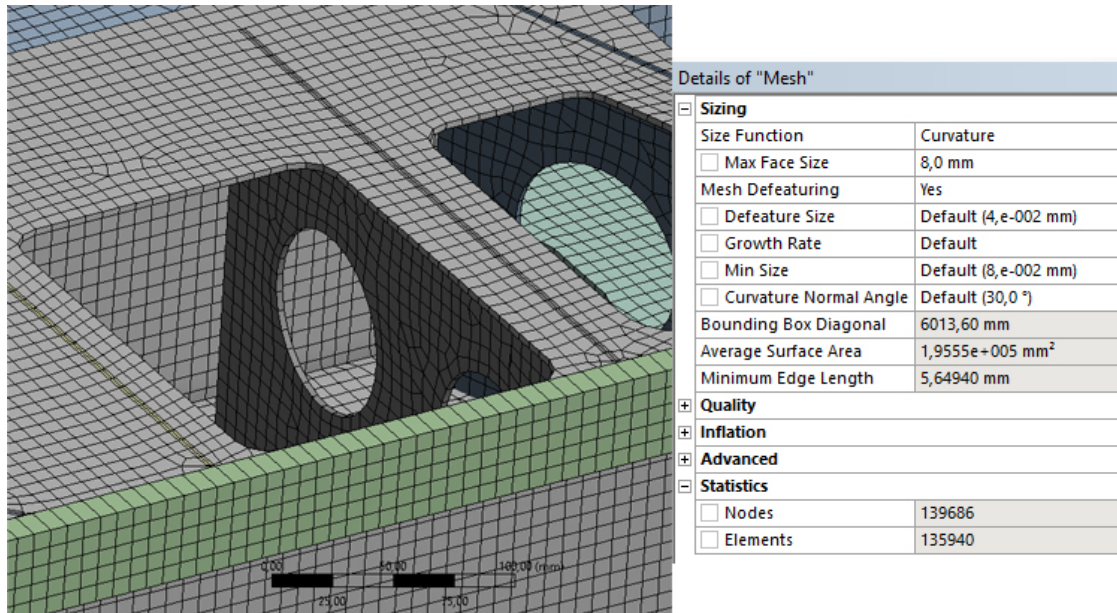
Laskennassa päädyin käyttämään kuorimallia umpinaisen mallin sijaan. Kuorimalli soveltuu paremmin levymäisten rakenteiden analysointiin, kuten tietoperustan luvussa ”FEM-analyysi” todetaan. Analyysissä käytetty kuorimalli mallinnettiin ”Autodesk Inventor 2020” -ohjelmistolla. Kuorimallin mallintaminen tapahtui pintamallinnustyökaluilla, jolloin tuloksena oli useista erillisistä pinnoista koostuva kokonaisuus ilman materiaalivahvuuksia (ks. kuvio 34). Kuorimallin olisi pystynyt mallintamaan myös suora laskentaohjelmistossa, mutta kappaleen monimutkaisen rakenteen vuoksi päädyttiin käyttämään erillistä mallinnusohjelmistoa. Mallista jätettiin pois pienet yksityiskohdat, kuten pienet reiät. Kuorimallia käytettäessä materiaalivahvuudet määritellään laskentaohjelmistossa jokaiselle pinnalle erikseen.



Kuvio 34. Kuorimalli Autodesk Inventorissa

Laskentaohjelmistona käytettiin Ansys workbench 19.0 -ohjelmistoa. Laskenta tapahtui koululla opiskelijoiden käytössä olevilla koneilla, jolloin käytössä oli ”ANSYS Academic Teaching Mechanical and CFD”-lisenssi. Tämä lisenssi mahdollisti monimutkaisempien ja yksityiskohtaisempien laskentamallien käytön ilmaisversioon verrattuna. Nosto- ja kuljetustilanteiden analysointiin käytettiin Ansysin ”Static structural”-analyysia. Kummassakin tapauksessa käytettiin samaa laskentamallia ja vain reunaehtoja

muutettiin. Elementtiverkotuksen jälkeen mallissa oli elementtejä 139686 kpl ja solmuja 135940 kpl (ks. kuvio 35). Suurimpien elementtien koko noin 8 mm. Materiaalivahvuuksien määrittelyn jälkeen laskentamallin painoksi tuli noin 352 kg, joka on hyvin lähellä piirustukseen merkittyä massaa 355 kg.



Kuvio 35. Laskentamallin elementtiverkotus

#### 4.7.2 Kappaleen noston analyysi

Kappaleen noston analyysissä haluttiin selvittää kappaleen nostamisesta rakenteeseen aiheutuvat jännitykset ja taipumat. Nostotilanteeksi valittiin päistä tapahtuva nosto siinä suunnassa, joka aiheuttaa tyypillisen toleranssiylityksen suuntaista taipumaa rakenteeseen.

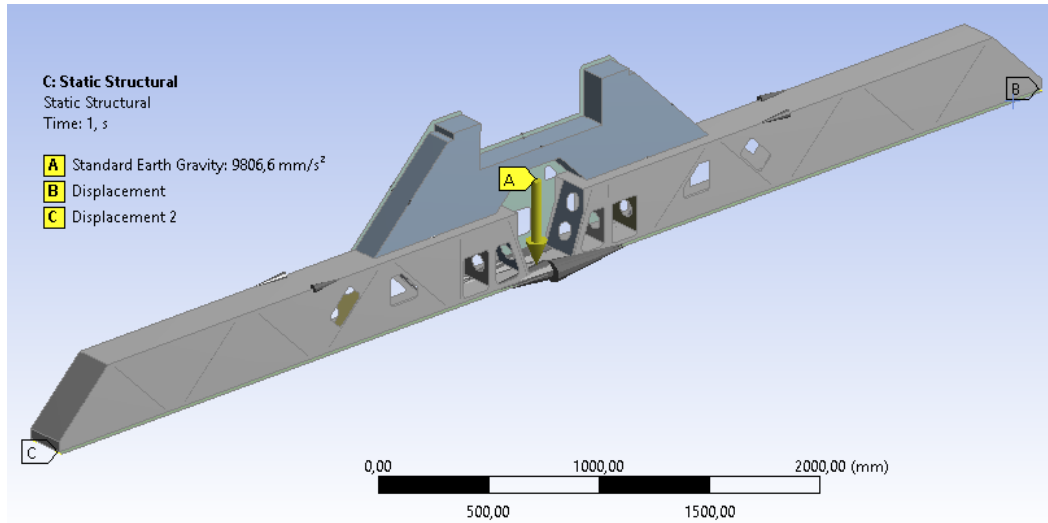
#### Reunaehdot

Nostoanalyysin reunaehdot näkyvät kuviossa 36, jossa:

A: Tuenta viivasta, jolle kiertymä sallittu ja siirtymät estetty X, Y ja Z suunnassa.

B: Tuenta viivasta, jolle kiertymä sallittu ja siirtymä estetty Z-akselin suunnassa

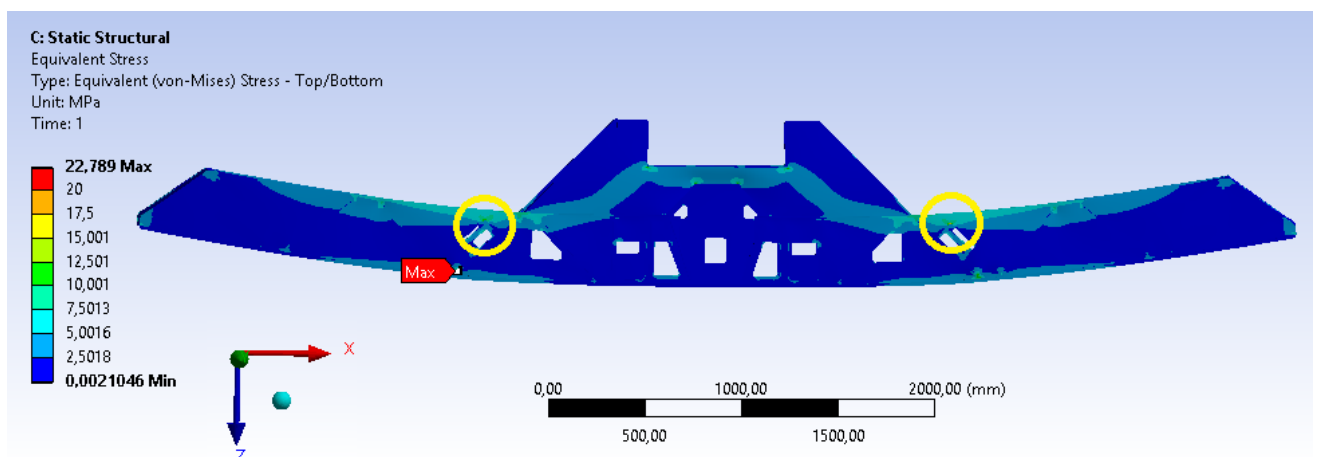
C: Vakiomaanvetovoimakiihtyvyys  $9,806 \text{ m/s}^2$  Z-akselin suuntaisesti



Kuvio 36. Nostoanalyysin reunaehdot

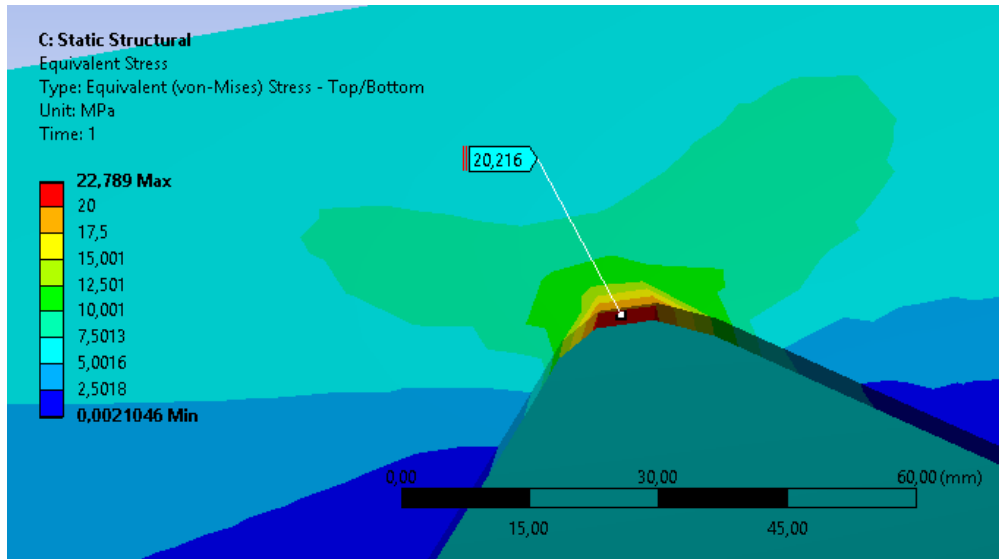
### Jännitykset

Suurimmat jännitykset olivat noin 23 MPa. Ne olivat paikallisia jännityksiä ja sijaittivat muutaman solmun kohdalla kuorien liitoskohdassa. Maksimijännityksen sijainti osoitettu punaisella nuolella kuviossa 37. Tätä maksimijännitystä pidettiin epärealistisena sen sijaitessa yksittäisten solmujen kohdilla.



Kuvio 37. Jännitykset nostossa

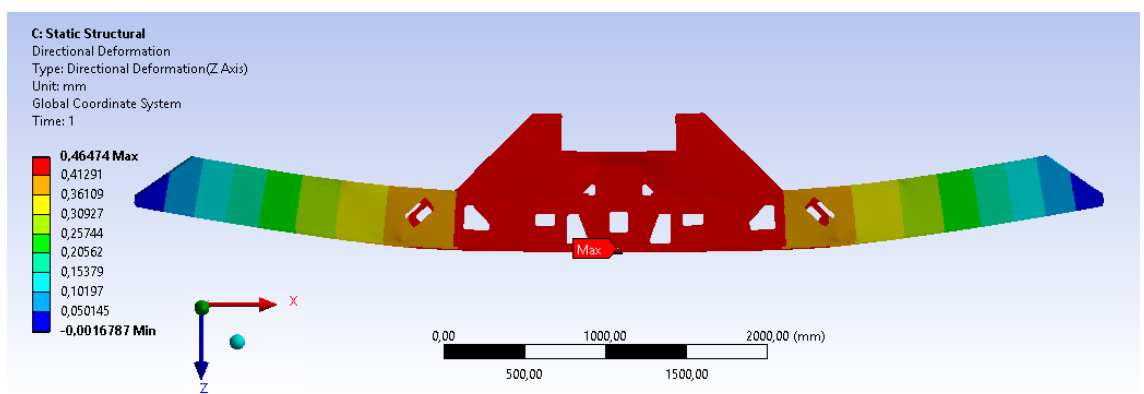
Realistisempi jännityskeskittymä muodostui levyssä olevan kolon nurkkapyöristyksen kohdalle kummallekin puolelle kappaleen ollessa symmetrinen. Jännityskeskittymien paikat esitetty kuviossa 37 keltaisella ympyrällä. Jännityskeskittymä esitetty lähemmin kuviossa 38. Suurimmat jännitykset näissä kohdissa olivat noin 20 MPa.



Kuvio 38. Jännityskeskittymä nostossa

### Muodonmuutos

Noston aiheuttama muodonmuutos Z-akselin suunnassa oli kappaleen keskivaiheilla noin 0,47 mm (ks. kuvio 39).



Kuvio 39. Noston aiheuttama muodonmuutos kappaleessa Z-akselin suunnassa.

### **Yhteenveto**

Materiaalin myötöraja on 355 MPa. Analyysin tuloksien perusteella kappaleen päistä tapahtuvassa nostossa ei aiheudu myötörajan ylittäviä jännityksiä. On kuitenkin huomioitava, että analyysissä käytetty laskentamalli ei sisältänyt todellisessa kappaleessa olevia virheitä tai pienimpiä yksityiskohtia. Nämä saattavat aiheuttaa laskentamallista puuttuvia jännityskeskittymiä, joissa jännitykset voivat nousta laskennan tuloksia suuremmiksi. Myöskään nostossa tapahtuvien epätasaisten liikkeiden tai heilahduksien vaikutusta ei huomioitu. Myötörajan ylittymistä noston aikana voidaan kuitenkin pitää hyvin epätodennäköisenä. Kappaleen nostaminen analyysin mukaisessa asennossa on myös epätodennäköistä painopisteen sijainnin takia.

#### **4.7.3 Kuljetuksen analyysi**

Kuljetuksen analyysissä selvitettiin myötörajan suuruisten jännitysten syntymiseen tarvittavaa voimaa ja taipumaa. Selkeä jännityskeskittymä muualla, kuin kiinnityspisteessä määritettiin ehdoksi. Voiman suuruus saatiin kasvattamalla voimaa niin kauan, että myötörajan suuruiset jännitykset syntyivät.

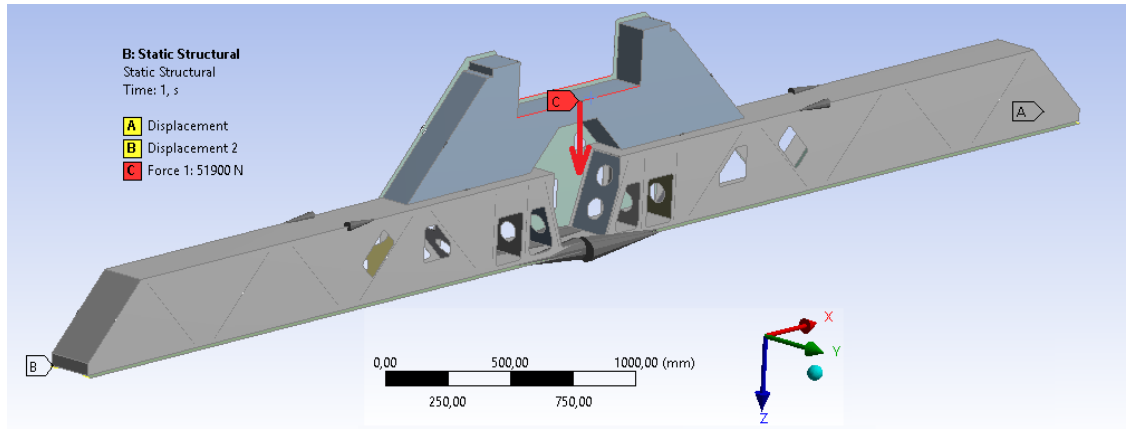
### **Reunaehdot**

Kuljetusanalyysin reunaehdot on esitetty kuviossa 40, jossa:

A: Tuenta viivasta, jolle kiertymä sallittu ja siirtymät estetty X,Y ja Z-suunnassa

B: Tuenta viivasta, jolle kiertymä sallittu ja siirtymä estetty Z-akselin suunnassa

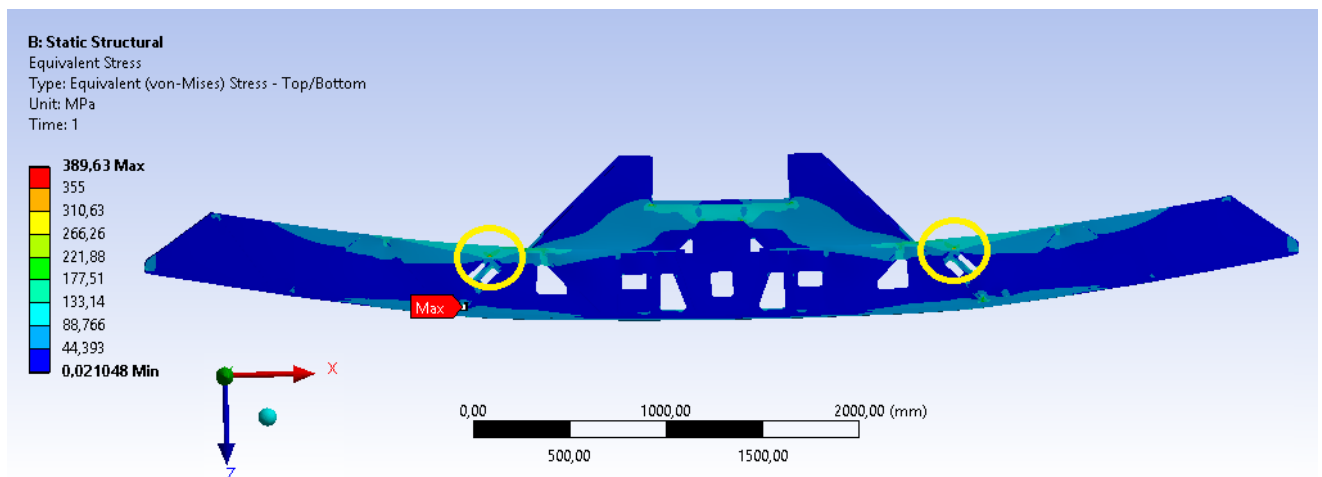
C: Viivaan kohdistettu voima  $F=51900$  N



Kuvio 40. Kuljetusanalyysin reunaehdot

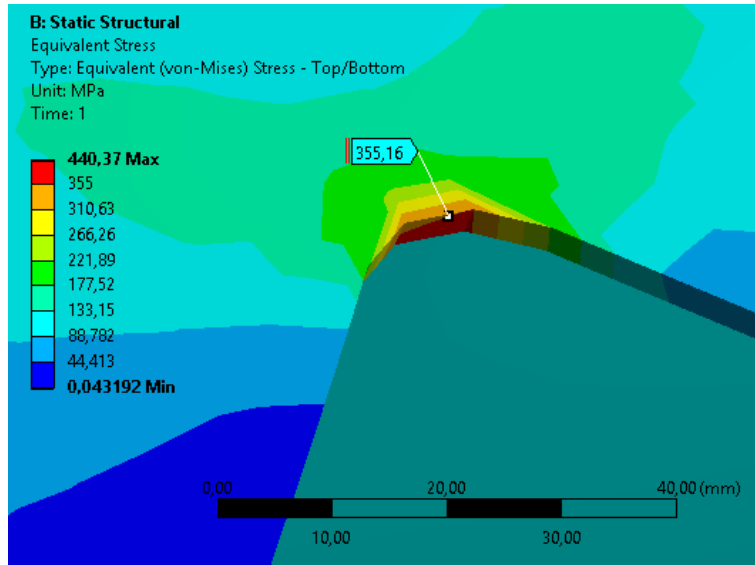
### Jännitykset

Suurimmat jännitykset ovat noin 390 MPa. Ne sijaittivat muutamissa solmuissa pintojen liitoskohdissa, jonka takia niitä ei pidetty todellisina jännityksinä. Maksimi jännityksien sijainti osoitettu punaisella nuolella kuviossa 41.



Kuvio 41. Jännitykset kuljetuksessa

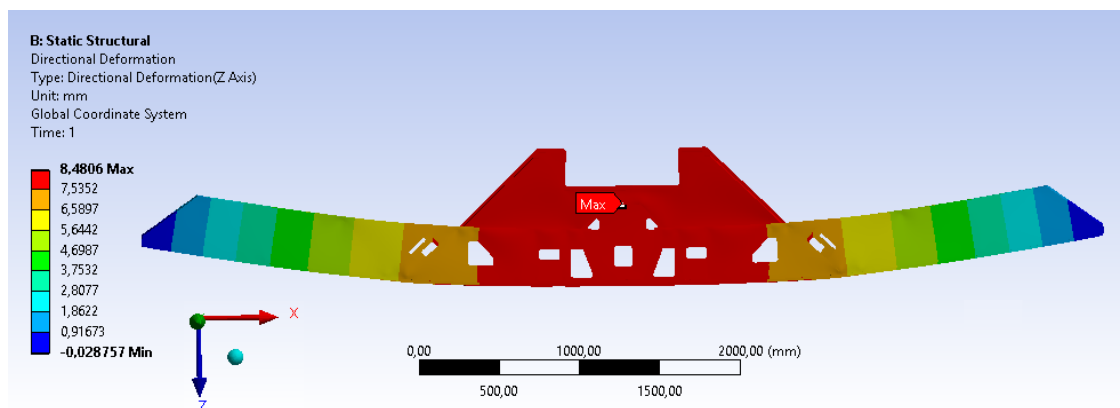
Myötörajan suuruiset realistisina pidettävät jännityskeskittymät muodostuivat taas levyssä olevien kolojen kohdille, jotka on merkitty keltaisilla ympyröillä kuvioon 43. Jännityskeskittymä esitetty tarkemmin kuviossa 42.



Kuvio 42. Jännityskeskittymät kuljetuksessa

## Muodonmuutokset

Myötörajan suuruisten jännityskeskittymien syntyessä Z-akselin suuntainen muodonmuutos oli suurimmillaan noin 8,5 mm (ks. kuvio 43).



Kuvio 43. Maksimi siirtymä kuljetuksessa



### **Yhteenveto**

Analyysin perusteella myötörajan suuruisten jännityskeskittymien syntymiseen tarvitaan noin 51900 N:n suuruinen voima tai noin 8,5 mm siirtymä. Tämä riittää rakenteen myötäämiseen paikallisesti, mutta muualla olevat jännitykset ovat silti kaukana myötörajasta. Lineaarilla analyysillä myötörajan ylittymisestä aiheutuvien pysyvien muodonmuutosten vaikutusta rakenteen geometriaan ei pystytty selvittämään, vaan siihen olisi tarvittu epälineaarista analyysia. Analyysissä käytetyn kuorimallin yksinkertaistusten takia todellisessa rakenteessa olevissa yksityiskohdissa saattaisi ilmetä myötörajan ylittäviä jännityskeskittymiä, joita tässä analyysissa ei havaittu.

## **5 Työn tulokset ja kehitysehdotukset**

Ennen opinnäytetyön käynnistymistä toleranssiylitykset vähentyivät ja reiluja ylityksiä ei enää ilmennyt. Samoihin aikoihin oli palattu käyttämään kuljetustelinettä koneistettujen kappaleiden kuljetukseen ja joidenkin kappaleiden koneistamiseen oli käytetty normaalista poiketen eri työstökoneita. Näistä kumpaakaan muuttujaa ei pystytty yhdistämään kappaleiden sarjanumeroihin, jonka takia näiden kahden muutoksen vaikutuksista yksittäisiin kappaleisiin on hankala todeta. Ellei huomattavia toleranssiylityksiä ilmene voidaan olettaa näiden kahdella muutoksella olleen asiaan vaikutusta. FEM-analyysien perusteella kuljetuksen aikaisessa kiinnityksessä ei pitäisi syntyä vaurioita, mutta on asiasta hankala varmistua.

Koneistusalihankkijalla tapahtuvassa kappaleen kuljetuksessa pohjamaalaukseen ja takaisin kappale kiinnitetään päistä tuettuna keskeltä kiristysliinalla. Kiinnityksestä aiheutuvat jännitykset vaihtelevat, koska kiristystiukkuus ei ole tarkasti hallittavissa. Mikäli myötöraja kiristyksen aikana ylittyy se aiheuttaa kappaleen rakenteeseen myötörajan suuruisia sisäisiä jännityksiä. Tähän vaaditaan FEM-analyysissa todettua 51900 N suurempi voima, koska analyysissa käytettiin koneistettua rakennetta, joka poistetun materiaalin takia on ennen koneistamatonta kappaletta heikompi. Rakenteeseen syntyneiden sisäisten jännitysten laukeaminen koneistuksen aikana voi aiheuttaa kappaleessa muodonmuutoksia. Toisaalta jännityksien laukeaminen pitäisi

käydä ilmi koneistuksen jälkeen tehtävässä mittauksessa ja johtaa korjaaviin toimenpiteisiin. Kehitysehdotus on muuttaa kuljetuksen aikainen kiinnitys sellaiseksi, että se aiheuttaisi kappaleeseen mahdollisimman vähän taipumaa. Kiinnitys voitaisiin toteuttaa esimerkiksi päädyissä olevien tukipisteiden kohdilta, jolloin siitä syntyvä taipuma ja jännitykset rakenteeseen olisivat pienet.

Koneistuksen aikaiset lämpötilaerot aiheuttavat kappaleeseen hallitsemattomia muodonmuutoksia. Tutkimuksessa ei seurattu koneistuksen aikaisia lämpötiloja, joten niistä ei ole varmaa näyttöä. Ilmiö kuitenkin korostui asiantuntijan haastattelussa ja siihen löytyi vahvistusta myös tietoperustasta. Esimerkiksi talvella kylmän ilman virtaaminen sisälle koneistuksen aikana aiheuttaa huomattavia lämpötilaeroja. Nopeiden lämpötilan muutosten vaikutuksista työstökoneen ja kappaleen geometriaan tulisi tutkia.

Koneistamiseen käytetyllä työstökeskuksella ei tulisi mitata, sillä itsellään koneistettua kappaletta. Koneistettaessa kappaleesta koneistetaan koneen geometrian mukainen, jolloin koneessa ilmenevät heitot eivät näy kappaleessa. Silloin myös lämpötiloista johtuvat muodonmuutokset koneen geometriassa eivät tule mittauksessa ilmi. Työstökoneella suoruuden mittaamisessa tapahtuvan virheen ja epävarmuuden voi kuitenkin selvittää 180°:n kääntöä hyödyntävällä virheen eliminointikeinolla. Ohje tämän toteuttamisesta tutkitulle kappaleelle on esitetty liitteessä 9. Ennen pintakäsittelyä tehdyt mittaukset kuitenkin osoittavat koneistuksesta tulleiden kappaleiden olevan tasomaisuustoleranssin rajoissa, joten eliminointikeinolle ei toistaiseksi ole tarvetta. Työstökoneella tapahtuvaa mittausta voidaan puolustella sen olevan kappaleessa tapahtuneiden sisäisten jännitysten laukeamisesta johtuvien muodonmuutoksen seurantaan.

Hitsauksesta kerättyjen mittapöytäkirjojen avulla havaittiin selkeä yhteys hitsaajan ja suurimman suoruusheiton välillä. Hitsauksessa syntyvien jäännösjännitysten määrä riippuu useasta eri asiasta, jolloin erot hitsaajien välillä vaikuttaa niiden suuruuteen. Regressioanalyysissä kaikki suurimmat heitot osuivat hitsaajan 2 kohdalle. Tässä tulee kuitenkin huomata puutteellinen määrä kokoonpanon mittauspöytäkirjoja. Ana-

lyyseihiin oli käytössä mittapöytäkirjat kappaleista, joissa oli havaittu toleranssin ylittäviä suoruusvirheitä opinnäytetyön alkuvaiheessa. Lisäksi käytössä oli pintakäsittelyn vaikutuksen tutkimiseen tarkoitettuista mittapöytäkirjoista pintakäsittelyn jälkeen tehdyt mittaukset. Näiden mittauspöytäkirjojen välillä oli kuitenkin valmistettu huomattava määrä kappaleita, joiden mittauspöytäkirjat eivät olleet analyysissä mukana. Ajankohdat saattoivat sattumalta ajoittua hitsaajan vaihtumiseen, joka näytettyi analyysissä selkeänä yhteytenä hitsaajan ja suurien suoruusvirheiden välillä. Tämä vaikuttaa analyysin luotettavuuteen niin paljon, ettei hitsaajan yhteyttä suoruusvirheisiin voida todeta. Aiheesta tulisi tehdä jatkotutkimus, joissa vastaavaan analyysiin otettaisiin mukaan väliltä puuttuvat mittauspöytäkirjat.

Pintakäsittelyn vaikutuksia selvitettiin mittaamalla kappaleita ennen ja jälkeen pintakäsittelyn. Muutokset olivat pieniä ja suurimmassa osassa niistä oli havaittavissa sama ilmiö muodonmuutoksessa. Mittauksia oli käytössä vain 4 kappaletta, joten suurempia johtopäätöksiä ei päätetty tehdä. Voidaan todeta pintakäsittelyn vaikuttavan kappaleiden muotoon. On kuitenkin epätodennäköistä, että ennen työn aloittamista ilmenneet huomattavat toleranssiylitykset olisivat täysin syntyneet pintakäsittelyssä. Ennen pintakäsittelyä tehtäviä mittauksia tulisi jatkaa, jolloin havaittu ilmiö saisi vahvistusta.

### **Yhteenveto**

Todennäköisimmät syyt toleranssiylityksien syntymiseen ovat koneistetun kappaleen vaurioituminen kuljetuksessa ilman kuljetustelinettä ja pintakäsittelyssä tapahtuvat muodonmuutokset.

Toleranssiylityksiin vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötilaeroista johtuvat muodonmuutokset koneistuksen aikana, jäännösjännitysten syntyminen ennen koneistusta tapahtuvassa kuljetuksessa ja jäännösjännitysten syntyminen hitsausvaiheessa.

## 6 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää todennäköisimmät syyt toleranssiylityksien syntymiseen sekä listata niiden syntymiseen vaikuttavia tekijöitä. Työn tuloksena esitettiin kaksi todennäköistä syytä ja kolme vaikuttavaa tekijää. Tutkimuksessa päästiin alussa määritettyihin tavoitteisiin. Toimeksiantajan kannalta paras tulos olisi ollut yhden selkeän vastauksen löytäminen, jolla toleranssiylitykset saataisiin loppumaan.

Työn luotettavuuden kannalta merkittävimmät ongelmat ovat tilastollisissa analyysissä. Analyysissä käytettiin toleranssiylityksien takia luotuja mittauspöytäkirjoja. Mittauspöytäkirjat joudutaan luomaan yksitellen, joka tarkoittaa huomattavaa työ määrää tilastollista analyysia ajatellen. Tilastollisiin analyysihin paneuduttiin vasta loppuvaiheessa, jolloin aikataulullisista syistä kaikkia mittauspöytäkirjoja ei saatu tutkimukseen mukaan. Luotettavuuden näkökulmasta ainoastaan pintakäsittelyä voidaan pitää luotettavana tuloksena, koska sen vaikutukset on osoitettu useilla mitauksilla. Ennen työn alkamista ilmenneiden huomattavien toleranssiylitysten syntymiseen ei löytynyt luotettavaa selitystä.

Valmistuksen jakautuminen useille eri alihankkijoille vaikutti työssä käytettyihin menetelmiin. Jos kappaleen valmistus olisi tapahtunut toimeksiantajan tiloissa työväiheisiin olisi pystynyt perehtymään paremmin ja alihankkijoille aiheutuvista kustannuksista ei olisi tarvinnut välittää. Tutkimuksesta ei haluttu lisäkuluja valmistukseen osallistuville alihankkijoille. Tutkimukseen haastetta lisäsi tasomaisuustoleranssin tarkkuus. Kaikista käytössä olleista XY-tason mittaustuloksista suurin havaittu suuruusvirhe oli 0,153 mm, joka ylitti asetetun 0,05 mm toleranssin reilusti. 0,153 mm on kuitenkin huomattavan pieni suuruusvirhe, kun otetaan huomioon kappaleen 6000 mm:n pituus, rakenne ja valmistusmenetelmät. Vertailunvuoksi standardissa SFS-EN 22768-2 on määritetty koneistuksen yleistoleranssin tarkimmassa H-luokassa rajaksi 0,4 mm tasomaisuudelle ja suoruudelle pituuksilla  $>1000 \leq 3000$  mm (Valtinen 2013, 595).

Työn aikataulun kannalta selkeän aiherajauksen lisäksi työn alussa olisi pitänyt selkeämmin rajata mihin osa-alueeseen työssä keskitytään. Työn alussa tutustuttiin tutkittavaan kappaleeseen ja valmistukseen kuuluviin työvaiheisiin. Tämän jälkeen jokaiseen työvaiheeseen tutustuttiin perusteellisemmin syy-seuraussuhteiden täydentämiseksi. Tietoperustan laajentuessa useaan osa-alueeseen vähensi se yksittäisiin aiheisiin perehtymistä. Jälkeenpäin ajateltuna työssä olisi pitänyt tutustua koneistuksen aikaisiin lämpötiloihin ja sen jälkeisessä mittausvaiheessa. Tilastolliset analyysit olisi pitänyt suorittaa perusteellisemmin laajemmalla aineistolla. Kappaleessa koneistuksen jälkeen tapahtuviin aikaan sidonnaisiin muodonmuutoksiin olisi pitänyt tutustua. Tämä työ oli tiedettävästi ensimmäinen kyseistä laatuongelmaa käsittelevä tutkimus, jolloin tässä tutkimuksessa tehtyä yleisempää perehtymistä voi käyttää pohjana aiemmin mainittujen asioiden jatkotutkimuksissa.

Työn aikana käsiteltiin monia itselleni uusia asioita, joista opin paljon uutta. Vierailut eri alihankkijoilla ja valmistusvaiheiden näkeminen käytännössä muistutti käytännön ja teorian eroista. Kaiken kaikkiaan työ oli opettavainen ja hyödyllinen kokemus, vaikka itsellä tavoitteena ollut selvän ratkaisun löytäminen ei toteutunutkaan.

## Lähteet

- Andersson, P. & Tikka, H. 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. Porvoo: WSOY.
- Chapman, M. A. V., Fergusson-Kelly, R., Holloway, A., Lock, D. & Lee, W. 2016. Interferometric angle measurement and the hardware options available from Renishaw. <http://resources.renishaw.com/en/download/white-paper-interferometric-angle-measurement-and-the-hardware-options-available-from-renishaw--81981>.
- Esala, V-P., Lehto, H. & Tikka, H. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.
- Grzesik, W. 2008. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications. Amsterdam: Elsevier BV.
- Huei-Huang, L. 2018. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19. Mission: Stephen Schroff.
- Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 2011. Valmistustekniikka. Helsinki: Otatieto.
- Ilmatieteen laitoksen sääasemien arkisto. Viitattu 21.1.2020. <https://kilotavu.com/fmi-tilastot.php>.
- Kananen, J. 2011. Kvantti: kvantitatiivisen opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kananen, J. 2013. Case-tutkimus opinnäytetyönä. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.
- Kivivuori, S. & Härkönen, S. 2009. Lämpökäsittelyoppi. 2.p. Helsinki: Teknologiainfo Teknova.
- Kume, H. 1998. Laadun parantamisen tilastolliset menetelmät. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus.
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2011. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. 1.-5.p. Helsinki: WSOY.
- Lepola, P. & Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro.
- Maaranen, K. 2012. Koneistus. Helsinki: Sanoma Pro.
- Niemi, K. & Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. Helsinki: Painatuskeskus.

Parviainen, M. 2019. Lehtori. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Keskustelu 2.5.2019.

Peuranen, H. 2019. Ongelmanratkaisumenetelmät.pdf. Kehittämistekniikat-  
opintojakso. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu konetekniikka. Viitattu 15.10.2019.  
Optima-oppimisympäristö.

Valtanen, E. 2013. Tekniikan taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis-Kirjat.

## Liitteet

Liite 1. Teemahaastattelun runko: hitsaus

# Teemahaastattelun runko: Hitsaus

1. Hitsausparametrit (=lämmöntuonti)
  - a. Virta ja Jännite
  - b. Kuljetusnopeus
  - c.
2. Osien asetus
  - a. Menetelmät
  - b. Toistettavuus
  - c.
3. Hitsausjärjestys
  - a. Vaihtuvuus
  - b. Keinot ja ohjeet
  - c.
4. Olosuhteet
  - a. Ympäristö
  - b. Työntekijät
  - c. Käytetyt koneet ja laitteet
  - d.
5. Aihiot
  - a. Materiaali
  - b. Leikkaus
  - c. Särmäys
  - d.



# Teemahaastattelun runko: Jännitystenpoistohehkkutus

1. Kappaleiden asettelu uunissa
  - a. Asento
  - b. Käsiteltävien kappaleiden määrä
  - c. Lämpötilan mittaus
2. Parametrit
  - a. Käsitteilyn kesto
  - b. Käsitteilyn lämpötila
  - c. Lämpötilan muutoksien nopeudet
  - d.
3. Työntekijä
  - a. Kappaleiden käsitteily
  - b. Kokemus
  - c.
4. Ympäristö
  - a. Ilmakosteus
  - b. Lämpötila
  - c.
5. Laitteisto
  - a. Useita uuneja
  - b. Eroavuudet
  - c.

# Teemahaastattelun runko: Koneistus

1. Työstöarvot
  - a. Vaikutus lämmöntuontiin
  - b. Kappaleen taipuminen
  - c. Syöttönopeus ja syvyys
2. Aihio
  - a. Varastointiaika
  - b. Magneettisuus
  - c. Jännitystilat
  - d.
3. Työntekijät
  - a. Toimintatavat
  - b. Nopeus
  - c. Huolellisuus
  - d. Kokemus
  - e.
4. Työstökone
  - a. Koneen mittatarkkuus
  - b. Kompensoinnit
  - c. Viimeisin kalibrointi
  - d.
5. Ympäristö
  - a. Lämpötila
  - b. Lämpötilan muutokset
  - c. Vuodenaika
  - d.

## Teemahaastattelun runko: Suoruuuden mittaus laserinterferometrillä

1. Kiinnitys mittauksen aikana
  - a. Vastaako koneistusta
  - b. Kiristystiukkuus
  - c. Onko useita jigejä
  - d.
2. Ympäristön olosuhteet
  - a. Ilmanpaine
  - b. Ilmankosteus
  - c. Ilmanlämpötila
  - d.
3. Mittaajan vaikutus
  - a. Kokemus
  - b. Yleiset virheet
  - c. Vaihtoehtoiset toimintatavat
  - d.
4. Mittavälineet
  - a. Useat vaihtoehtoiset mittavälineet
  - b. Mittavälineiden kalibrointi ja kunto
  - c.

## Alustavat syy-seuraussuhteet: Hitsaus

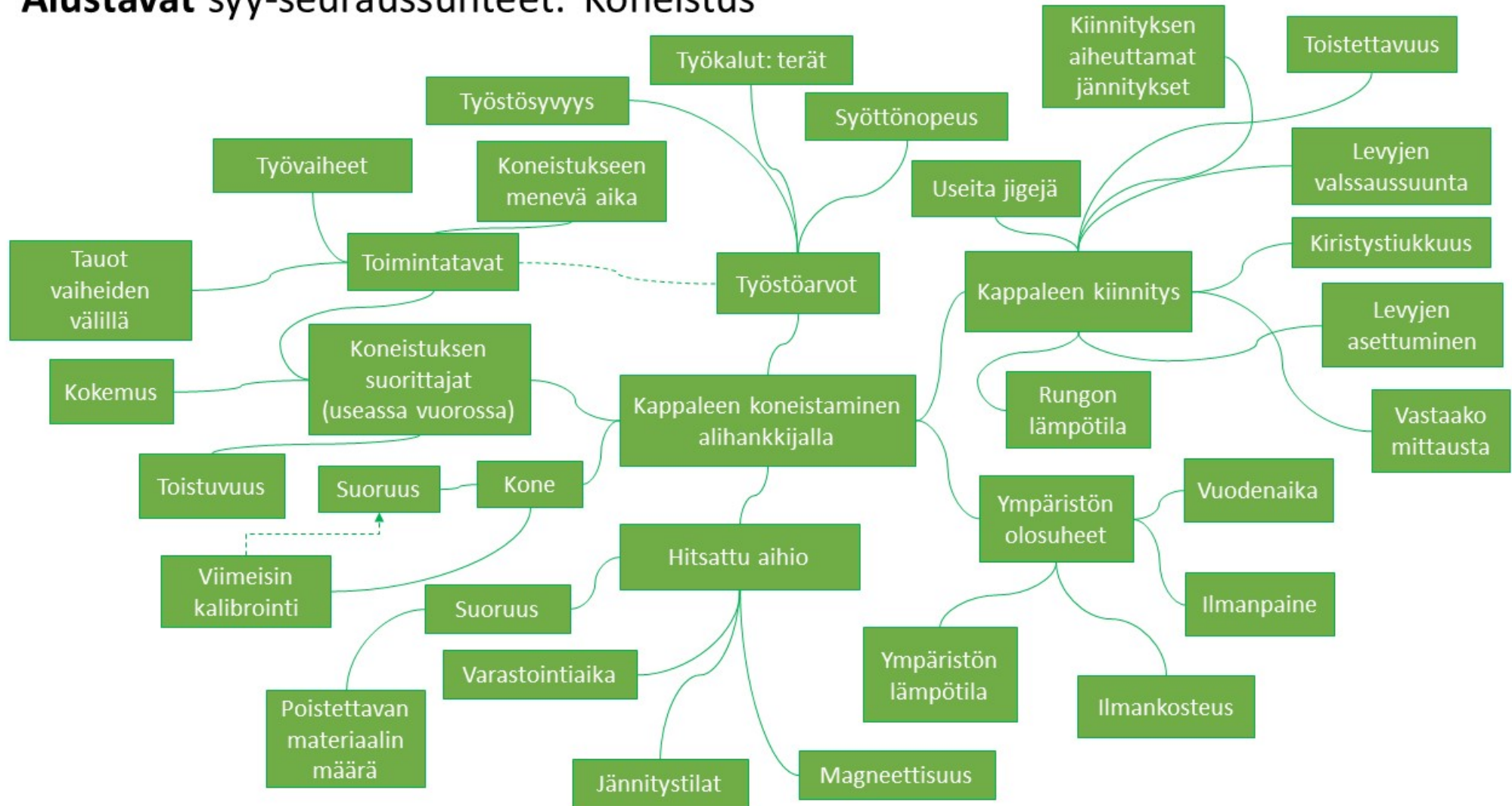


Liite 6. Alustavat syy-seuraussuhteet: jännitystenpoistohehkus

## Alustavat syy-seuraussuhteet: Jännitystenpoistohehkus

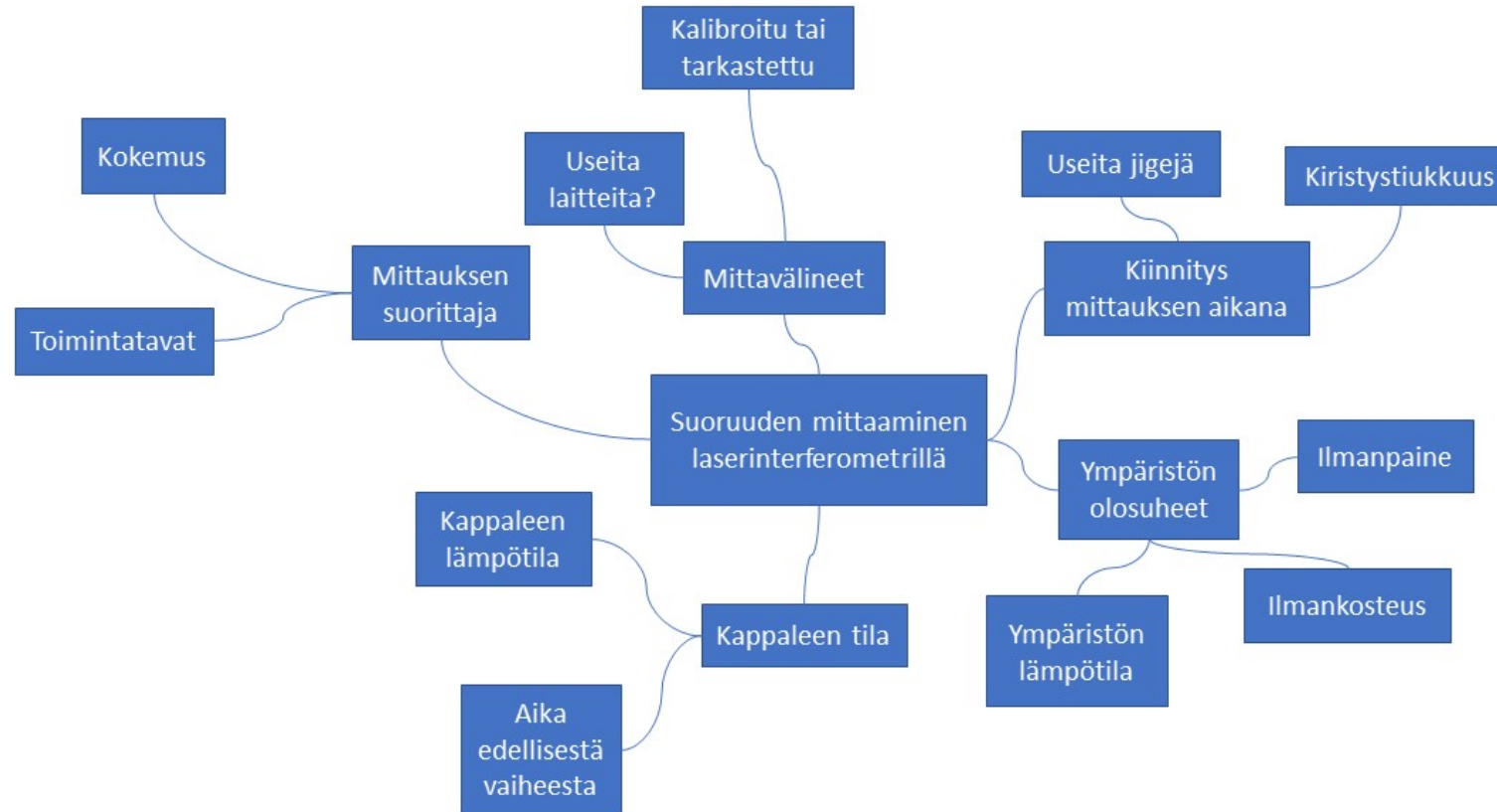


## Alustavat syy-seuraussuhteet: Koneistus



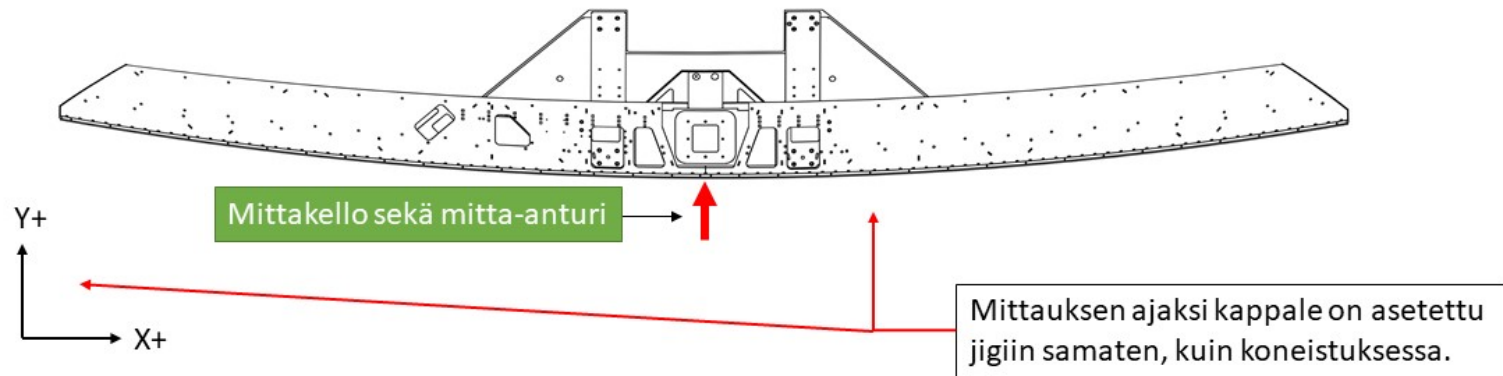
Liite 8. Alustavat syy-seuraussuhteet: suoruuden mittaus laserinterferometrillä

## Alustavat syy-seuraussuhteet: Suoruuden mittaus laserinterferometrillä

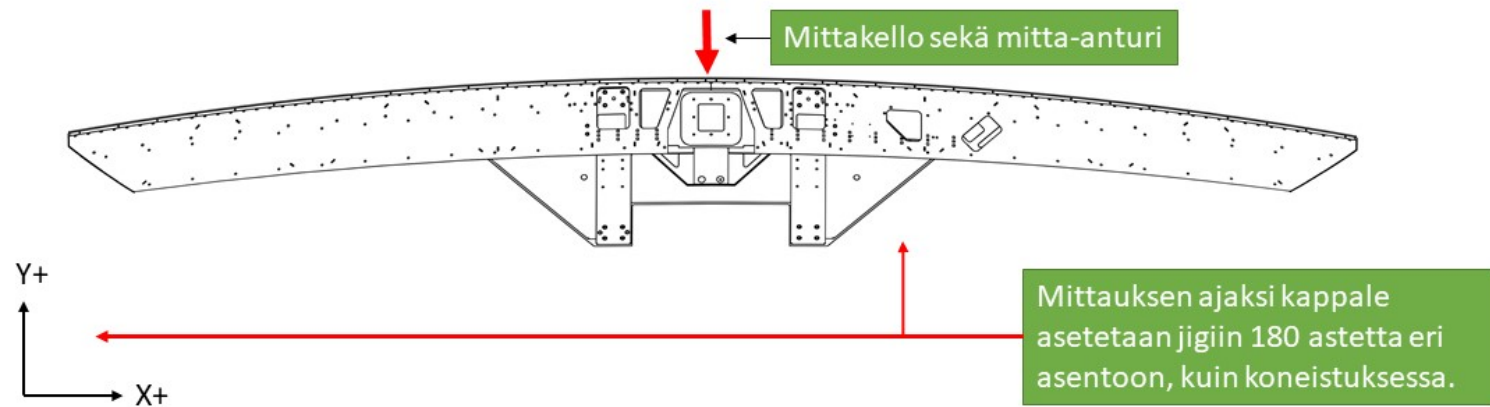


## Liite 9. Työstökoneen suoruusvirheen eliminointi kappaleen mittauksessa

Nykyinen käytäntö mittauksessa:

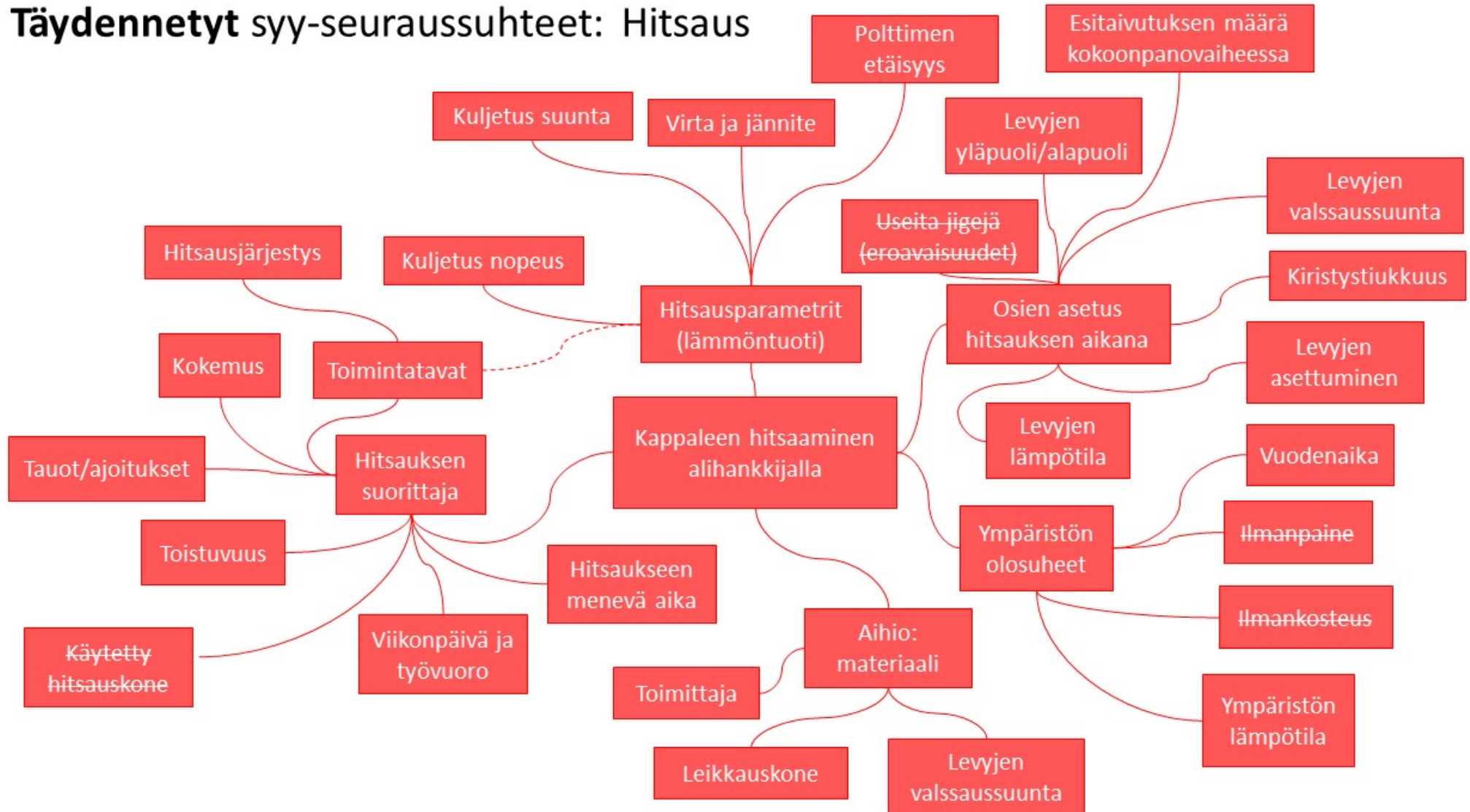


Ehdotus kappaleen mittauksesta toisella tavalla:





## Täydennetyt syy-seuraussuhteet: Hitsaus



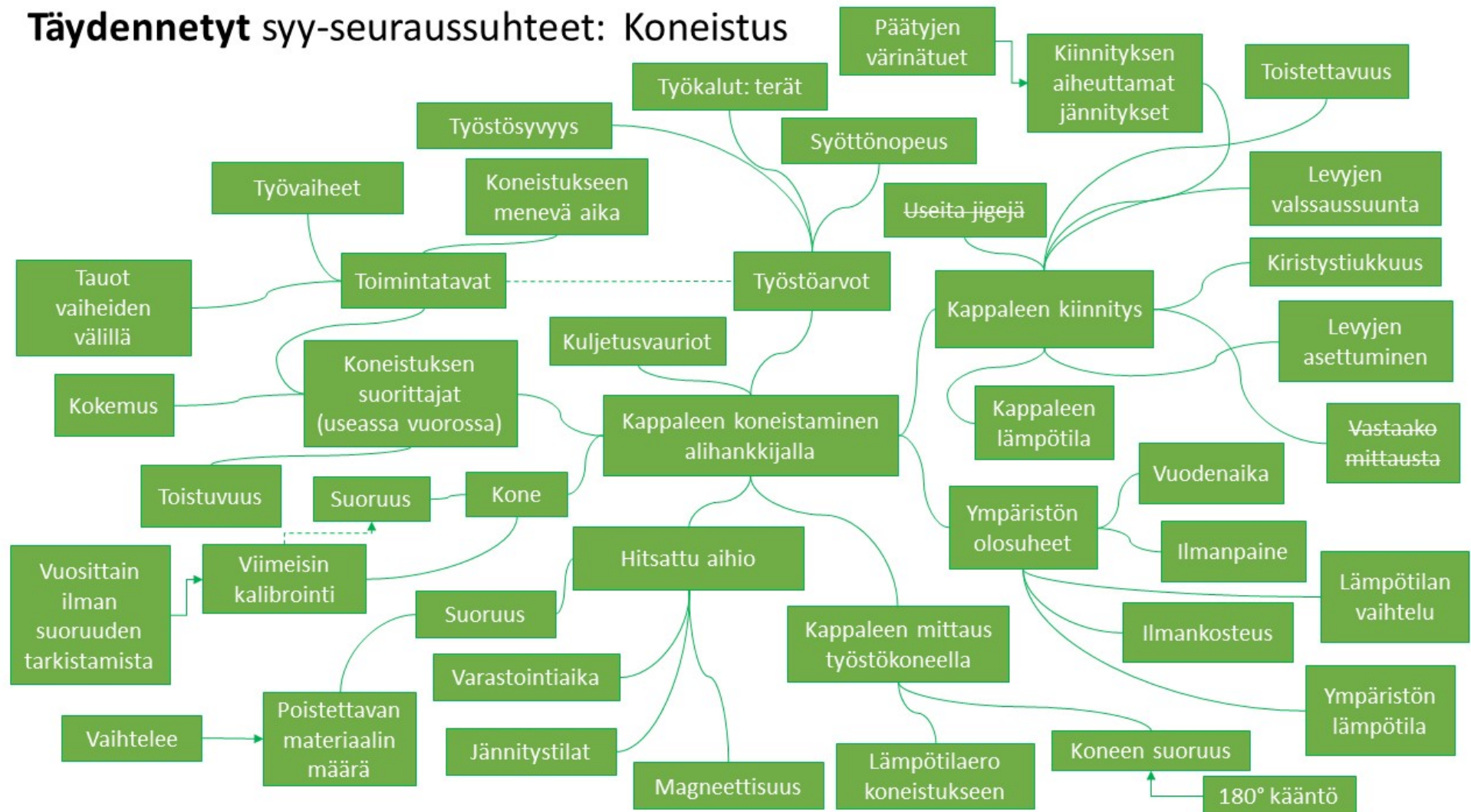
Liite 11. Täydennetyt syy-seuraussuhteet: jännitystenpoistohehkus

## Täydennetyt syy-seuraussuhteet: Jännitystenpoistohehkus



## Liite 12. Täydennetyt syy-seuraussuhteet: koneistus

## Täydennetyt syy-seuraussuhteet: Koneistus



Liite 13. Täydennetyt syy-seuraussuhteet: suoruuden mittaus laserinterferometrillä

## Täydennetyt syy-seuraussuhteet: Suoruuden mittaus laserinterferometrillä

