



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Veikka Ankkuri

Kiinnitinjärjestelmän suunnittelu hitsausrobotisolun paikoituslaitteistoon

Opinnäytetyö
Kevät 2025
Insinööri (AMK), Konetekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Veikka Ankkuri

Työn nimi: Kiinnitinjärjestelmän suunnittelu hitsausrobotisolun paikoituslaitteistoon.

Ohjaaja: Kimmo Kitinoja

Vuosi: 2025

Sivumäärä: 61

Liitteiden lukumäärä: 0

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella Alvarin Metall Oy:lle tulevaan uuteen robottihitsaussoluun kiinnitinjärjestelmä, jonka avulla mahdollistetaan useiden eri työkappaleiden vieminen robotille hitsattavaksi. Tavoitteena oli myös kehittää yritykselle yksityiskohtainen CAD-kokoonpano suunnitellusta kiinnitinjärjestelmästä, jotta sitä voidaan jatkossa hyödyntää hitsausrobotin etäohjelmoinnissa sekä tuotekohtaisten kiinnitysosien suunnittelussa.

Työn aikana sovellettiin statiikan ja dynamiikan teoriaa suunnittelun tueksi. Teorian pohjalta havaittiin erityisesti tukireaktioiden merkittävä vaikutus kiinnitinjärjestelmän kuormitukseen ja se, kuinka paljon kuormitukset voivat vaihdella riippuen työkappaleiden painosta ja niiden painopisteen sijainnista järjestelmässä. Havaintojen avulla järjestelmän rakennetta tarkasteltiin kokonaisuutena, ja suunnitteluratkaisut tehtiin siten, että ne muodostavat tasapainoisen suunnitelman rakenteellisten vaatimusten ja käytettävyyden välillä.

Työn lopputuloksena saatiin yritykselle alustava mitoitus kiinnitinjärjestelmälle, Excel-pohjaiset laskentatyökalut kuormitusten laskemiseksi sekä yksityiskohtainen CAD-kokoonpano. Näitä tuloksia voidaan hyödyntää järjestelmän jatkokehityksessä ja lopullisen mitoituksen toteuttamisessa. Tuloksien avulla voidaan kehittää tulevaisuudessa myös vaihtoehtoisia kiinnitysratkaisuja sekä laskea poikkeuksellisen suurien työkappaleiden muodostamia kuormituksia kiinnitysjärjestelmässä ja paikoituslaitteistossa.

¹ Asiasanat: hitsaus, robotiikka, lujuuslaskenta, elementtimenetelmä, mekaniikka

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Mechanical Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Veikka Ankkuri

Title of thesis: Design of a fixture system for the positioning equipment of a robotic welding cell

Supervisor: Kimmo Kitinoja

Year: 2025

Number of pages: 61

Number of appendices: 0

The objective of the thesis was to design a fixture system for a new robotic welding cell at Alvarin Metall Oy, enabling the transfer of multiple workpieces to the robot for a welding process. Additionally, the study aimed to develop a detailed CAD assembly of the designed fixture system, which could later be used for the offline programming of the welding robot as well as for the design of product-specific fixture components

The design process was supported by the application of statics and dynamics theory. The analysis revealed the significant impact of support reactions on the loading conditions of the fixture system, as well as the considerable variation in loads caused by differences in workpiece mass and the location of their center of gravity within the system. These findings guided a holistic design approach, where each structural decision was assessed for its balance between load-bearing capacity and operational usability.

As a result, the project delivered a preliminary dimensioning of the fixture system, Excel-based calculation tools for load analysis, and a comprehensive CAD assembly. These outcomes serve as a practical foundation for the further development and final dimensioning of the system. Moreover, they enable the evaluation of alternative fixture concepts and support the assessment of extreme loading scenarios involving exceptionally large workpieces within the fixture and positioning setup.

¹ Keywords: welding, robotics, strength calculation, finite element method, mechanical design

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tausta	9
1.2 Työn tavoite.....	9
1.3 Työn rakenne	9
1.4 Yritysesittely	10
2 HITSAAUS, ROBOTIIKKA JA LUJUUSLASKENTA.....	12
2.1 Hitsaus liitosmenetelmänä	12
2.1.1 MIG/MAG-hitsaus	13
2.1.2 Hitsauksen turvallisuus ja säätely	13
2.2 Robotiikka hitsauksessa	14
2.3 Teollisuusrobotin rakenne	15
2.3.1 Mekaniikka	15
2.3.2 Servomootorit ja anturointi	15
2.3.3 Ohjaus	16
2.4 Radat ja portaalit	17
2.5 Paikoituslaitteet	18
2.6 Lujuuslaskenta osana mekaniikkasuunnittelua	19
2.7 Perinteinen lujuuslaskenta	19
2.8 FEM-laskenta	20
3 KIINNITINJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU UUDELLE HITSAUSROBOTILLE.....	21
3.1 Hitsausrobotti	22
3.2 Paikoituslaitteistot.....	23

3.2.1	Yksiakselinen paikotuslaitteisto.....	23
3.2.2	Kaksiakselinen paikoituslaitteisto.....	23
3.3	Tuotekartoitus ja rajaus.....	24
3.4	Robotin rakenteen ja ulottuvuuden vaikutus kiinnitinjärjestelmän suunnitteluun ..	25
3.5	Rungon suunnittelu.....	27
3.6	Työkappaleiden kiinnitys runkoon.....	29
3.7	Kiinnitinjärjestelmän alustava CAD-mallinnus.....	30
4	KIINNITINJÄRJESTELMÄN KUORMITUSTEN MÄÄRITTELY.....	32
4.1	Tukireaktioiden määrittely.....	33
4.2	Ääritilanteiden määrittely.....	34
5	KUORMITUSTEN JA RASITUSTEN LASKENTAMENETELMÄT.....	36
5.1	Perinteinen lujuuslaskenta.....	36
5.1.1	Painopisteen sijainnin vaikutus x-akselilla.....	37
5.1.2	Kääntökulman vaikutus runkoon.....	39
5.1.3	Muut lujuuslaskentaan vaikuttavat tekijät.....	45
5.2	Lujuuslaskenta elementtimenetelmää hyödyntäen.....	47
5.2.1	Kiinnitinjärjestelmän rakenteen luominen virtuaaliseen ympäristöön.....	47
5.2.2	FEM-laskennan optimointi.....	49
5.2.3	FEM-laskennan valmistelu.....	51
5.2.4	FEM-laskennan tuloksia.....	53
6	TULOKSET JA POHDINTA.....	57
7	YHTEENVETO.....	59
	LÄHTEET.....	61

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Ilmasta kuvattu näkymä Alvarin Metallin Oy:n toimitiloista Karvialla	11
Kuva 2. Yritykseen saapuneen robottisolun kaksiakselinen paikoituslaite	18
Kuvio 1. Yritykseen tilattu hitsausrobottisolu	22
Kuvio 2. Alustava CAD-malli kiinnitinjärjestelmän peruskiinnikkeistä	30
Kuvio 3. Alustava CAD-kokoonpano kiinnitinjärjestelmästä	31
Kuvio 4. Kiinnitinjärjestelmän paikoituslaitteen kiinnityskohta	33
Kuvio 5. Vapaakappalepiirros tuetun ulokepalkin tilanteesta	34
Kuvio 6. Vapaakappalekuvio kiinnitinjärjestelmään kohdistuvista kuormituksista painopisteen siirtyessä pyörähdysakselin x pituussuuntaisesti	37
Kuvio 7. Runkoon kohdistuva väännön suuruus pisteessä x	38
Kuvio 8. Runkoon kohdistuvan väännön suuruus ja suunnan vaihtuminen pisteessä x. ...	38
Kuvio 9. 45 asteen tilanteensa työkappaleen muodostama vääntö rungossa	40
Kuvio 10. 45 asteen tilanteesta muodostuvan väännön jako voimien komponentteihin	40
Kuvio 11. 90 asteen tilanteesta työkappaleen muodostama vääntö rungossa	42
Kuvio 12. 90 asteen tilanteesta muodostuvan väännön jako voimien komponentteihin	42
Kuvio 13. Paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavat voimat painopisteiden ollessa samalla puolella pyörähdysakselia	43
Kuvio 14. Paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavat voimat painopisteiden ollessa eri puolella pyörähdysakselia	43

Kuvio 15. Paikoituslaitteen raakoja raja-arvoja kokonaispainon ja sen maksimietäisyydelle pyörähdysakselista painopisteiden ollessa samalla puolella pyörähdysakselia.	44
Kuvio 16. Kiihtyvyydestä runkoon muodostuva vääntö painopisteen ollessa pyörähdysakselin x alapuolella.	46
Kuvio 17. Kiihtyvyydestä runkoon muodostuva vääntö painopisteen ollessa pyörähdysakselin x yläpuolella.	46
Kuvio 18. Kiinnitinjärjestelmän runkoprofiilien mallinnus Solid Edge Student Edition 2024 Frame-ympäristössä.	48
Kuvio 19. Runkoprofiilien liitos ilman optimointia.	50
Kuvio 20. Runkoprofiilien liitos optimoituina FEM-laskentaa varten.....	50
Kuvio 21. FEM-laskentaa varten luotu elementtiverkko kiinnitinjärjestelmän kokoonpanosta.	50
Kuvio 22. Voimien komponentit sijoitettuna FEM-laskentaan	52
Kuvio 23. FEM-laskentatulokset 0 asteen tilanteessa.....	53
Kuvio 24. FEM-laskentatulokset 45 asteen tilanteessa.....	54
Kuvio 25. FEM-laskentatulokset 90 asteen tilanteessa.....	55
Kuvio 26. FEM-laskentatulokset 0 asteen tilanteessa kiinnitinjärjestelmä taipuessa.	56
Taulukko 1. Laskentatyökalun taulukko, jossa on esitetty käänkökulman muodostamat voimien komponentit.	41

Käytetyt termit ja lyhenteet

CAD-malli	3D-malli, joka on luotu tietokoneavusteisen suunnitteluohjelman avulla (Computer-aided Design).
Hitsausohjelma	Tuotekohtainen kokoelma hitsauskomentoja, joiden avulla teollisuusrobotti hitsaa tuotteen.
Kuormitus	Rakenteeseen kohdistuva voima tai momentti, joka voi syntyä esimerkiksi painovoimasta, lämmöstä tai hitausvoimista.
Myötöraja	Materiaalikohtainen vetojännityksen raja, jonka jälkeen rakenteeseen muodostuu pysyviä muutoksia.
Rasitus	Kuormituksesta johtuvaa rakenteessa syntyvää vastetta, joka kuvastaa, millä tavalla rakenne reagoi sitä kuormittamalla.
Servomoottori	Asemointiin tarkoitettu sähkömoottori, joka on varustettu asentoanturilla.
Solu	Teollisuusrobotin tai -robottien työskentelytila, joka sisältää robotin ohjainlaitteet ja turvajärjestelmät sekä muut robottien oheislaitteet
Tukireaktio	Voima tai momentti, joka syntyy rakenteeseen tukipisteen kautta tasapainottaen esimerkiksi painovoimasta syntyvän kuormituksen.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Karvialla sijaitsevaan Konepajayritykseen Alvarin Metalli Oy on tehty uusi hitsausrobotti-investointi, jonka päämääränä on kehittää yrityksen tuotantoa automatisoimalla aikaa vieviä hitsausprosesseja. Tuleva hitsausrobottisolun on jaettu kahteen osaan, joissa hitsattavia työkappaleita voidaan käsitellä joko yksi- tai kaksiakselisella paikoituslaitteistolla. Paikoituslaitteet tarvitsevat monikäyttöiset ja kestävät kiinnitinjärjestelmät, jotta mahdollisimman monia yrityksessä valmistettavia tuotteita voitaisiin kiinnittää uuden robotin hitsattavaksi. Työssä suunnitellaan tulevan hitsausrobottisolun yksiakseliselle paikoituslaitteistolle kiinnitinjärjestelmä, jonka avulla mahdollistetaan suurikokoisten työkappaleiden kiinnitys paikoituslaitteistoon.

1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on suunnitella yritykseen tulevan hitsausrobottisolun yksiakseliseen paikoituslaitteistoon kiinnitinjärjestelmä, joka mahdollistaa useiden eri yrityksessä valmistettavien työkappaleiden hitsaamisen uudella robotilla. Kiinnitinjärjestelmä pitää olla mahdollisimman monikäyttöinen, kestävä, turvallinen ja yrityksen tarpeita vastaava. Hyvin suunniteltu kiinnitinjärjestelmä mahdollistaa monien erilaisten työkappaleiden viemistä robotille hitsattavaksi. Tällä tavoin robotin käyttöaste saadaan maksimoitua sekä tuotekohtaiset tuotantokustannukset pienennettyä.

Suunniteltavan kiinnitinjärjestelmän lisäksi työn tavoitteena on suunnitella yritykselle kiinnitinjärjestelmästä yksityiskohtainen CAD-malli, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa hitsausrobotin etäohjelmointia tehdessä. Etäohjelmoinnin lisäksi suunniteltavaa mallia on tarkoitus hyödyntää tulevaisuudessa tuotekohtaisten kiinnitysosien kehittämiseen.

1.3 Työn rakenne

Työn rakenne koostuu yhteensä yhdeksästä eri luvusta, joiden aikana työn eri vaihteita käydään kattavasti läpi. Luvussa 1 esitellään työn tausta, tavoitteet sekä yritys, jossa työ

on suoritettu. Luvussa 2 käydään läpi hitsaukseen liittyvää perustietoa sekä syvennyttään teollisuusrobottien hyödyntämiseen hitsausprosessien nopeuttamiseksi ja automatisoimiseksi. Samalla rajataan aihealuetta melko huomattavasti työn kannalta oleelliseksi, sillä hitsaus ja teollisuusrobotit ovat todella laajoja aihealueita jo sellaisenaan. Luvussa selitetään myös lujuuslaskentaan liittyviä tekijöitä sekä avataan työssä käytettäviä lujuuslaskentamenetelmiä.

Luvussa 3 kerrotaan työn alkutilanteesta, jossa perehdytään tarkemmin yritykseen tulevaan hitsausrobottisolun. Luvussa käydään läpi kyseisen robottisolun paikoituslaitteistoon suunniteltavan kiinnitinjärjestelmän eri suunnitteluvaiheita ja siihen liittyviä menetelmiä. Luvussa 4 pohjustetaan tulevaa lujuuslaskentaa määrittelemällä kiinnitinjärjestelmään kohdistuvia kuormituksia ja niiden merkittävyyttä.

Luvussa 5 syvennyttään varsinaiseen lujuuslaskentavaiheeseen. Luvussa käydään läpi rakenteeseen vaikuttavia kuormitustilanteita sekä niiden laskentaan liittyviä menetelmiä. Luvussa 6 käydään läpi työn aikana saatuja tuloksia sekä koettuja haasteita. Luvussa myös pohditaan mahdollisia kehityksiä tulevaisuutta ajatellen. Viimeisessä luvussa 7 on yhteenveto suoritetusta työstä kokonaisuudessa.

1.4 Yritysesittely

Konepaja Alvarin Metalli Oy sijaitsee Pohjois-Satakunnassa Karvialla samalla paikalla, jossa yritys alun perin perustettiin vuonna 1978 (Alvarin Metalli, i.a.-a). Alvarin Metalli on perheyritys, joka työllistään yhteensä 110 työntekijää (Eurometalli, 2023). Tuotanto on painottunut koneiden ja laitteiden osiin sekä osakokonaisuuksiin. Suuri osa yrityksessä valmistettavista tuotteista on raskaita terästuotteita, mutta monipuolinen tuotantomenetelmä mahdollistaa myös pienempien osien tuotannon. Yrityksessä tehdään teräksen ohella myös alumiinin ja muiden metallilaatujen kanssa töitä.

Yrityksen toimitilat ovat noin 8000 m², ja ne sisältävät hitsaus- ja levyhallin, koneistus- ja kokoonpanotilat, puhallustilan, pintakäsittelyhallin, lähettämön ja valmiiden tuotteiden varaston sekä toimistotilat (Alvarin Metalli, i.a.-b). Käytössä on yhteensä 14 eri CNC-konetta, joiden kokoluokka ja ominaisuudet vaihtelevat paljon. Kattavat koneistumahdollisuudet mahdollistavat lähes kaikenkokoisten ja muotoisten osien koneistuksen. Yrityksen hitsaamossa on lukuisia työpisteitä sekä kaksi hitsausrobotia mukaan lukien tuleva robottihitsaussolu. Kuvassa 1 nähdään Alvarin Metalli Oy:n toimitilat ilmasta kuvattuna



Kuva 1. Ilmasta kuvattu näkymä Alvarin Metalli Oy:n toimitiloista Karvialla (Alvarin Metalli, i.a.-b)

2 HITS AUS, ROBOTIIKKA JA LUJUUSLASKENTA

Tässä luvussa käsitellään työn kannalta keskeistä teoriaa, jonka avulla tuetaan työn aikana tehtyjä ratkaisuja sekä varmistetaan, että toteutus vastaa alan vaatimuksia ja suosituksia. Yrityksen näkökulmasta teoria toimii tiedollisena tukena päätöksenteolle ja kehitystyölle. Oppimisen näkökulmasta teorian avulla syvennetään ammatillista osaamista ja tuetaan tiedon soveltamista käytännön ympäristöissä. Alussa käydään läpi hitsaukseen liittyvää perustietoa eri hitsausmenetelmistä, -turvallisuudesta ja prosessin robotisoinnista. Tämän jälkeen perehdytään teollisuusrobottien rakenteeseen, ohjaukseen ja niiden yhteydessä käytettäviin paikoituslaitteisiin. Teoriaosuuden lopussa käydään läpi vielä työssä käytettäviä lujuuslaskennan menetelmiä.

2.1 Hitsaus liitosmenetelmänä

Hitsaus on prosessi, jossa metalliosia liitetään toisiinsa kiinni hyödyntäen joko lämpöä tai puristusta (Lepola & Makkonen, 2005, s. 7–8). Prosessissa osat muodostavat kiinteän liitoksen sulamalla toisiinsa kiinni muodostaen yhtenäisen molekyyliarakenteen. Hitsausta käytetään paljon metallirakenteiden valmistuksessa pysyvien ja kestävien liitosten luomiseksi. Hitsausprosessista on kaksi päätyyppiä: puristuksella sekä sulatuksella toteutettu hitsaus. Puristushitsaus on täysin lisäaineetonta ja hitsaustapahtuma toteutetaan hyödyntäen osien välille muodostettua puristavaa voimaa. Sulahitsauksessa käytetään tyypillisesti lisäaineita ja hitsaustapahtuma tehdään kuumentamalla osia aineiden sulamisen saavuttamiseksi.

Sulahitsauksen muotoja on monia, ja niistä leisin on valokaarihitsaus (Kemppe, 2023). Valokaarihitsauksessa metallin sulatukseen käytetään nimensä mukaisesti sähköllä muodostettua valokaarta, joka voi saavuttaa jopa 10 000 asteen lämpötilan. Valokaaren tasaisuus vaikuttaa merkittävästi hitsauslaatuun ja liitoksen lujuuteen. Tästä syystä hitsausjännite sekä lisäaineen syöttönopeus ovat ratkaisevia tekijöitä. Hitsauksen laatuun vaikuttaa myös suojakaasun tyyppi sekä työskentelytekniikka. Sulahitsauksen menetelmiä on useita eri metallilaatuja ja käyttökohteita varten, joille on omat suojakaasut sekä lisäaineet.

2.1.1 MIG/MAG-hitsaus

MIG/MAG-hitsausprosessi saa nimensä valitun suojakaasun käytöstä (Kemppi, 2024b). MAG-hitsauksessa (Metal-arc active gas welding) käytetään aktiivista suojakaasua, joka reagoi hitsisulaan vakauttaen valokaarta ja tasaa aineen siirtymistä hitsisaumaan. MIG-hitsauksessa (Metal-arc inert gas welding) käytetään inerttiä kaasua, joka ei reagoi hitsisulaan vaan suojaa hitsisulaa hapettumisen varalta kovettumisen aikana. Näiden lisäksi suojakaasulla on myös oleellinen tehtävä hitsauspistoolin jäähdyttämisessä sekä epäpuhtauksien ja kosteuden estämisessä. Vaikka hitsausmenetelmän nimi tulee suojakaasusta, MIG/MAG-hitsauksen suurin ero muihin menetelmiin on hitsauksessa käytettävän lisäaineen syöttö hitsauspistoolin läpi (Kemppi, 2023). MIG/MAG-hitsauksessa valokaari muodostetaan lisäaineen ja hitsattavan kohteen välille. Itse hitsaustapahtuma tällä menetelmällä on hyvin automaattista, tauotonta ja monikäyttöistä, jonka ansiosta MIG/MAG-hitsaus on erityisen suosittua teollisuudessa ja kuluttajien käytössä.

2.1.2 Hitsauksen turvallisuus ja säätely

Kaarihitsaus on vaarallinen hitsausmenetelmä ja siihen liittyy useita vaaraa aiheuttavia tekijöitä (Kemppi, 2024a). Hitsauksen aikana muodostuva valokaari on sokaisevan kirkas. Valokaaresta säteilee voimakasta ultravioletti- ja infrapunasäteilyä, jotka vahingoittavat silmien näkökykyä. Valokaaren katsominen ilman asianmukaista suojausta voi aiheuttaa nopeasti pysyviä näköhaittoja. Lisäksi hitsauksessa muodostuva metallisula aiheuttaa suuren riskin palovammoille sekä tulipaloille. Myös hitsaussulasta hehkuva UV-säteily ärsyttää suojaamatonta ihoa. Hitsauksessa muodostuu myös myrkyllisiä kaasuja ja hiukkasia, jotka aiheuttavat syöpää ja keuhkosairauksia ilman riittävää hengityksen suojausta.

Koska hitsaus on perinteisesti hyvin manuaalista työtä, prosessi altistaa työntekijän siitä syntyville vaaratekijöille hyvin herkästi. Näistä syistä hitsausta varten on kehitetty useita erilaisia kansainvälisiä standardeja, joiden avulla siitä on saatu turvallisempi sekä luotettavampi liitosmenetelmä. Hitsaukseen liittyviä vaaratekijöitä on suuri määrä, ja ne ovat menetelmäkohtaisia, jonka takia riskit on nimetty ja jaoteltu hitsausmenetelmien mukaisesti standardissa ISO/TR 18786:2014. Hitsauksen vaaratekijöiden tunnistaminen on tärkeä osa hitsausturvallisuuden varmistamista mutta se ei yksinään takaa hitsauksen

turvallisuutta. Työssä käytettävien työvälineiden tulee olla luotettavia ja turvallisia käyttää, ja niitä varten on myös luotu omat standardit.

Hitsaus on todella monipuolinen liitosmenetelmä ja tämän takia sitä varten on kehitelty yli 400 standardia (Saloranta, 2024). Luotettava ja laadukas hitsausliitos saadaan aikaan vain valvomalla siihen liittyviä muuttujia, joita voidaan toteuttaa standardien avulla. Standardeilla voidaan varmistaa, että hitsauksessa käytettävät kaasut, lisäaineet, ohjeet, laatuvaatimukset, tarkastusmenetelmät sekä hitsausta suorittavien työntekijöiden pätevyudet ovat riittävällä tasolla. Suomessa metalliteollisuuden standardisoinnista vastaa vuonna 2007 perustettu Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry (METSTA), joka on nykyään vastuussa yli 8000 ISO-standardista Suomessa (METSTA, 2024).

2.2 Robotiikka hitsauksessa

Hitsausprosessin automaatio on ollut suuressa roolissa tuotannotehokkuuden kehittämisessä monella eri alalla aina 1970-luvun lopusta saakka (Stenbacka, 2009/2011, s. 31). Vuosituhannen taitteessa robottien kehitys ja taloudellinen kannattavuus nousi ennennäkemättömälle tasolle, joka loi robotisoinnista lähes välttämättömän osan teollisuusyritysten kilpailustrategiaa. Teollisuusrobottien hinnat vuosien 1996–2011 välillä laskivat noin 45 %, ja suhteutettuna robottien kapasiteetin kehitykseen todellinen hinnan lasku on yli 75 % (mts. s. 32–33).

Nykypäivänä teollisuusrobottien käyttö sarjatuotannossa on edellytys kehittyneissä teollisuusmaissa (Stenbacka, 2009/2011, s. 33). Robotin tuomien taloudellisten etujen lisäksi hitsausprosessin automatisointi tekee siitä turvallisempaa (Kemppe, 2024c). Tämän lisäksi teollisuusrobotin tekemä hitsausliitos on laadullisesti parempaa, luotettavampaa ja suurien hitsaustöiden toistettavuus on ensiluokkaista verrattuna käsin tehtyyn työhön. Käsin hitsaukseen verrattuna robotti pystyy noin 3–4-kertaiseen tuottavuuteen, jos tuotantoprosessi on optimoitu siten, että robotille saadaan tarpeeksi hitsattavaa (Latokartano ym., 2023, s. 38). Kun robotti saadaan työstämään tehokkaasti ilman merkittäviä katkoksia, voidaan arvioida, että robotti-investointi maksaa itsensä takaisin kahden vuoden aikana. Tämän edellytyksenä on robotin täyden potentiaalin hyödyntäminen.

2.3 Teollisuusrobotin rakenne

Teollisuudessa käytettävistä roboteista 90 % on kuuden vapausasteen omaavia käsivarsi-robotteja, joiden hyötykuorma vaihtelee 0,5 kg – 2000 kg välillä (Lempiäinen, 2023, s. 17). Robottien rakenne koostuu nivelistä sekä tukivarsista, joiden avulla luodaan robotin vapausasteet (mts. 19). Luontaisesti suurempi määrä vapausasteita mahdollistaa suuremman määrän saavutettavia pisteitä robotin liiketilassa. Kuusi vapausastetta mahdollistaa jokaisen mahdollisen pisteen saavuttamisen robotin liiketilassa, jonka takia hitsauksessa käytettävät teollisuusrobotit ovat yleensä aina kuuden vapausasteen robotteja. Robottien rakenne voidaan jakaa kolmeen pääosaan: mekaniikka, servomootorit sekä anturointi ja ohjaus.

2.3.1 Mekaniikka

Robotin liikkeet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: suoran suuntainen (lineaariliike) sekä suoran ympäri (kiertoliike) (Billing, 2023, s. 118). Liikkeet toteutetaan nivelien avulla, jotka muuttavat tukivarsien asentoja. Tästä syystä nivelien lukumäärä on suoraan verrannollinen liikeratojen monipuolisuuteen mutta ei vapausasteiden lukumäärään. Robotin vapausasteet kertovat sen kyvystä liikkua. Kuusi vapausastetta tarjoaa mahdollisuuden liikkua jokaiseen mahdolliseen suuntaan eli ylös, alas, eteen, taakse, ja sivuille, sekä kaikkien suuntien ympäri pyörähdysliikkeellä.

Roboteista puhuttaessa nopeasti nousee esille termi ulottuvuus (reach), joka tarkoittaa suurinta etäisyyttä, mihin robotti pystyy siirtämään ranteen peruspisteen (Billing., 2023, s. 118). Peruspiste määräytyy kahden viimeisen akselin leikkauspisteen perusteella, ja se antaa hyvän kuvan ulottuvuudesta. Tätä ei tule kuitenkaan sekoittaa liiketilaan (work space), joka kuvastaa tilaa, minkä sisällä robotti pystyy siirtämään siihen asennettua työkalua mihin tahansa paikkaan ja missä asennossa tahansa.

2.3.2 Servomootorit ja anturointi

Robottien nivelien kääntämiseen käytetään sähköisiä kestopomotoituja harjattomia servomootoreita (Billing., 2023, s. 119). Servomootorit tarjoavat rakenteensa ansiosta

erinomaisen teho/painosuhteen, joka mahdollistaa robotin nopeat sekä tarkat liikkeet. Tyyppillisesti servomootorit on kytketty välyksettömään vaihteistoon, jonka avulla jokaisesta nivelestä saadaan riittävän tarkka ja voimakas.

Nivelien servomootorit sisältävät takaisinkytkentäanturin, joka voi olla rakenteeltaan pulsianturi, resolveri tai takometri (Billing ym., 2023 s. 119). Antureiden tehtävänä nivelissä on seurata servomootorin akselin asentokulmaa. Erillinen laskuri pitää kartalla nivelien kierrokset. Näiden avulla mahdollistetaan, että jokaisen nivelen asentotieto on tauotta ohjausjärjestelmän tiedossa.

2.3.3 Ohjaus

Teollisuusrobottien ohjaus perustuu pohjimmillaan kolmiulotteiseen koordinaatistoympäristöön (Billing, 2023, s. 123–124). Koordinaatistot mahdollistavat robotin tarkat paikoitukset ja niiden käsittelyn matemaattisesti. Jokaiselle robotin nivelelle on oma koordinaatisto, jotka on liitetty toisiin niveliin. Kaikki nivelien koordinaatistot ovat sidoksissa robotin peruskoordinaatistoon, joka kuvaa ensimmäisen nivelen paikkaa sekä asentoa. Koordinaatistojen sidosta robotiikassa kutsutaan kinemaattiseksi ketjuksi (mts. 125), joka voidaan luoda matemaattiseksi matriisiyhtälöksi esimerkiksi Denavit-Hartenbergin menetelmää käyttäen. Yhtälön muuttujat ovat robotin nivelkulmat, jotka ohjaustietokone saa reaaliaikaisesti servomootoreiden takaisinkytkennän kautta. Ketjun avulla kuvataan matemaattisesti robotin työkalulaipan sijainnin sekä asennon suhdetta peruskoordinaatistoon nähden.

Koordinaatistoja on muuallakin robotin ulottuvuudessa, ja ne yhdessä muodostavat koordinaatiojärjestelmän (Billing, 2023, s. 127). Perinteisesti järjestelmä muodostuu neljästä eri koordinaatistosta, joita ovat perus-, maailma-, työkalu- ja käyttäjäkoordinaatisto. Peruskoordinaatistolla viitataan robotin kiinteään koordinaatistoon, josta kinemaattinen ketju aloitetaan. Maailman koordinaatistolla kuvataan tilan koordinaatteja, jossa robotti sekä työstettävät kappaleet sijaitsevat. Työkalukoordinaatisto (TKP) tarkoittaa robotin työkalulle asetettua koordinaatistoa. Käyttäjäkoordinaatistolla kuvataan työstettävää kappaletta. Jokaisen koordinaatiston paikka sekä asento määräytyy kiinteän peruskoordinaatiston suhteen. Tätä kutsutaan myös nimellä referenssikoordinaatisto.

Jotta robotilla toteutettava työ onnistuisi tauotta, tulee ohjauksessa huomioida liikettä edeltävä aloitusasento, joka voidaan yksiselitteisesti määrittää paikoituspisteen avulla (Billing, 2023, s. 129) Paikoituspiste sisältää siihen ohjatun työkalupisteen paikan ja asennon lisäksi robotin nivelkulmat eli nivelkonfiguraation. Aloitusasennon huomioiminen on tärkeää, sillä robotit pystyvät siirtämään työkalupisteen haluttuun asentoon sekä paikkaan monessa eri nivelkonfiguraatiossa. Ohjaajan tulee valita konfiguraatioista paras liikkeen kannalta, jotta liikkeen aikana ei kohdata liikerajaa.

Robotin liikkeessä tulee huomioida nivelien liikerata, sillä on olemassa asentoja, jossa robotti menettää kyvyn siirtää työkalua haluttuun suuntaan (Billing, 2023, s. 130). Näissä tilanteissa kaksi niveltä asettuu samalle suoralle, joka tekee niistä saman keskeisiä. Tällaisessa tilanteessa nivelet muodostavat yhtenäisen vapausasteen, joka rajoittaa liikettä.

Näitä asentoja robotilla kutsutaan singulariteettipisteiksi. Jos liikerata kulkee singulariteettipisteen kautta, nousevat nivelkulmien nopeusarvot äärettömiin. Robottien valmistajat ovat huomioineet nämä pisteet ohjausjärjestelmässä, joka pysäyttää liikkeen sen osuessa singulariteettipisteeseen. Robotti voidaan ohjata myös ajamaan pisteiden ohi muuttamalla niiden kohdalla liikerataa väistäen singulariteetin.

2.4 Radat ja portaalit

Teollisuusrobottien työskentelyalueen laajentamiseksi robotit voidaan asentaa esimerkiksi lattialla kulkevalle radalle, jonka avulla ulottuvuutta voidaan kasvattaa huomattavasti (Billing, 2023, s. 135). Lisättyjen ulkoisten akselien toimintaperiaate on täysin sama verrattuna robotin omiin akseleihin. Ylimääräisen akselin liikkeiden ohjaus toteutetaan robotin oman ohjauksen koordinaattijärjestelmää laajentamalla. Teollisuusrobotti voidaan kiinnittää suoraan radalle tai vaihtoehtoisesti radalle voidaan kiinnittää portaalit, johon kiinnitettyä robottia voidaan liikuttaa telineen luomien lineaariakselien suuntaisesti (Keinänen ym., 2001, s. 307). Portaalit ovat erityisen hyödyllinen tapa lisätä ulottuvuutta, jos robottia on tarve siirtää usean eri lineaariakselin suuntaisesti.

2.5 Paikoituslaitteet

Teollisuusrobotin avuksi voidaan yhdistää työkappaleen paikoituslaite erillisenä akselina ohjattavaksi (Billing, 2023, s. 137). Paikoituslaitteilla mahdollistetaan työkappaleiden siirtäminen ja pyörittäminen riippuen siitä, millainen paikoituslaitteen rakenne on. Rakenne voi muodostua yhdestä tai useammasta akselista tarpeen vaatimalla tavalla.

Hitsauksessa paikoituslaitteen merkittävyys korostuu, sillä hitsaus pyritään lähtökohtaisesti tekemään aina jalkoasennossa. Tämä edellyttää hitsattavan työkappaleen asennon vaihtelua, joka voidaan toteuttaa paikoituslaitteen akseleiden integroinnilla osaksi robotin omaa ohjausjärjestelmää (Aalto & Kuivanen, 1999, s. 113).



Kuva 2. Yritykseen saapuneen robottisolun kaksiakselinen paikoituslaite (Alvarin Metalli, 2025).

Kuvassa 2 on esitetty Alvarin Metallin tilaamaan robottisolun sisältyvä paikoituslaite, joka on varustettu L-pöydällä. L-pöytä luo paikoituslaitteelle toisen käännettävän akselin, jonka avulla hitsattavia työkappaleita voidaan käsitellä hyvin monipuolisesti.

2.6 Lujuuslaskenta osana mekaniikkasuunnittelua

Lujuuslaskenta on tieteenala, joka on luonteeltaan analyyttistä (Hietikko, 2021, s. 13). Lujuuslaskenta on tärkeä osa mekaniikkasuunnittelua, jonka perusongelmana on riittävän luujan rakenteen suunnittelu. Rakennetta vahvistettaessa sen massa kasvaa, ja tällä muutoksella voi olla merkittäviä vaikutuksia muualle rakenteeseen. Lujuuslaskennan avulla tasapainotellaan rakenteen lujuutta siihen kohdistuvien kuormitusten nähden, jotta rakenteesta saadaan tarpeeksi luja mutta ei turhan painava ja kallis.

Analyttinen luonne muodostuu lujuuslaskentaan liittyvien raja-arvojen pohjalta, joka tarkoittaa, että rakenteen tulee toimia tiettyjen rajoitteiden sisällä (Hietikko, 2021, s.14). Kyseisiä raja-arvoja voi olla esimerkiksi suunniteltavassa rakenteessa käytetyn materiaalin myötöraja, jota rakenteeseen kohdistuvat rasitukset eivät saa ylittää. Jotta rakenteeseen kohdistuvia rasituksia voidaan laskea, tulee tilanteesta tuntea vähintään kuormitusten suuruus, suunta ja rakenteessa käytettävän materiaalin ominaisuudet.

2.7 Perinteinen lujuuslaskenta

Perinteinen lujuuslaskenta suoritetaan käsin, mikä tekee siitä hitaan prosessin ja nopeasti vaikean monimutkaisissa rakenteissa (Hietikko, 2021, s.14). Käsin laskentaa varten monimutkaisten tilanteiden tapauksia on hyvä jakaa osiin, joita käsitellä yksitellen laskentojen helpottamiseksi. Laskentoja varten suunnittelijan tulee tunnistaa kaikki rakenteen käyttöiän aikana muodostuvat tilanteet, joissa rakenne saattaa menettää toimintakykynsä.

Rakenteeseen kohdistuvia voimia lasketaan erilaisten kaavojen avulla, joiden tuloksia verrataan rakenteessa käytettävän materiaalin ominaisuuksiin (Hietikko, 2021, s.15). Lujuuslaskennassa on tyypillistä jättää raja-arvoon riittävä etäisyys lisäämällä laskemiin sopiva varmuuskerroin. Tällä tavalla varmistetaan, ettei laskelmiin liittyvien epävarmojen tekijöiden vaikutuksesta ylitetä runkoon liittyviä raja-arvoja.

2.8 FEM-laskenta

FEM-laskenta (Finite Element Method) tarkoittaa tietokoneavusteisesti suoritettua lujuuslaskentaa, joka mahdollistaa huomattavasti monimutkaisempien rakenteiden lujuuslaskennan suorittamisen (Hietikko, 2021, s.16). Tietokoneella suoritettava lujuuslaskenta ei kuitenkaan korvaa käsin tehtyä työtä. Tietokonepohjaisia lujuuslaskennan työkaluja tulee käyttää käsin laskennan apuna, jolloin varmistetaan laskentojen tarkkuus samalla nopeuttaen laskentaprosessia merkittävästi. FEM-laskenta eli elementtimenetelmä suoritetaan luomalla laskettavasta rakenteesta 3D-malli CAD-ohjelman avulla ja lisäämällä laskentaa varten tarvittavat tiedot (mts. 201). Nykyaikaiset laskentaohjelmistot ovat todella kehittyneitä, ja niiden avulla pystytään laskemaan myös kokoonpanoissa muodostuvia rasituksia.

Elementtimenetelmä toimii jakamalla rakenteen geometria nimensä mukaisesti elementteiksi (Hietikko, 2021, s. 171). Elementtejä yhdistävät niiden muodostamat solmupisteet, joiden avulla elementeistä muodostuu yhtenäinen verkko. Rakenteeseen kohdistettu kuormitus jakautuu elementtiverkkoa pitkin, kunnes verkon jokainen elementti on tasapainossa. Tämä tarkoittaa, että ulkoisen voiman vaikuttaessa mihin tahansa kohtaa rakenteessa, siirtyy tämä voiman vaikutus elementtiverkkoa pitkin koko rakenteen mukaisesti.

Elementtien kohdistamat voimat toisiinsa nähden lasketaan matriisilaskentaa hyödyntäen (Hietikko, 2021, s.171). Tämä johtuu siitä, että riippuen rakenteen geometriasta ja koosta FEM-laskennasta muodostuvien yhtälöiden määrä voi olla kymmeniä tai satoja tuhansia. Suuri määrä laskentoja asettaa myös ison riskin laskentavirheille, jonka takia FEM-laskenta tulee suorittaa huolellisesti.

Tyypilliset virheet FEM-laskennan laskentatuloksissa syntyvät elementtiverkosta muodostuvien terävyyksien takia (Hytönen, 2025). Elementtiverkosta muodostuvat virheet näkyvät laskentatuloksina huippuarvoina, jotka kohdistuvat rakenteen teräviin reunakohtiin. Huippuarvojen ratkaisemiseksi voidaan muuttaa elementtiverkkoa. Vaihtoehtoisesti suunnittelija voi katsoa, minkä rajan ylittävä arvo ei enää edusta rakenteessa muodostuvia todellisia rasituksia ja jättää huippuarvon huomioimatta. Tietyt laskentaohjelmat tarjoavat myös työkaluja laskentatulosten jälkikäsitteilyyn, joilla huippuarvoista muodostuvia virheitä voidaan korjata.

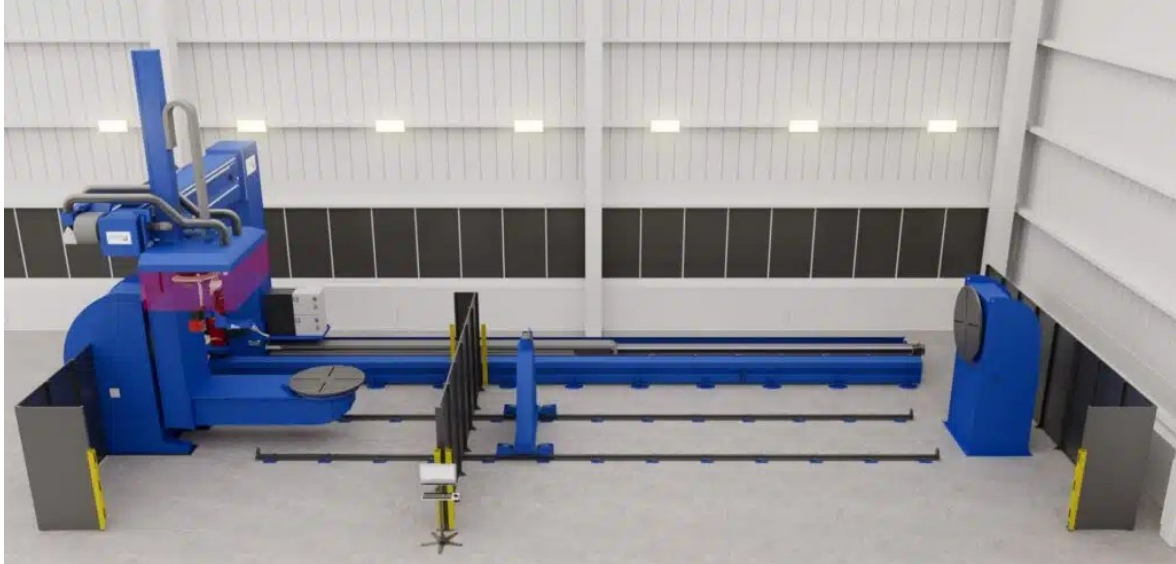
3 KIINNITINJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU UUDELLE HITSAUSROBOTILLE

Kiinnitinjärjestelmän suunnittelu on hyvin monipuolinen prosessi, joka edellyttää paljon tietoa hitsattavista kappaleista, robotin toiminnasta ja hitsausprosessista (A. Alvari, henkilökohtainen tiedonanto, 14.11.2024). Jotta suunniteltava kiinnitinjärjestelmä vastaa yrityksen tarpeita, tulee suunnittelijan kommunikoida hyvin yrityksen toimihenkilöiden sekä hitsaajien kanssa. Tämän lisäksi kiinnitinjärjestelmää tulee kehittää työn aikana tehokkaasti, jotta lopputuloksena on kokonaisvaltaisesti toimiva järjestelmä. Suunnitteluprosessissa on tärkeää huomioida oleelliset tekijät kiinnitinjärjestelmän suunnittelun kannalta, koska silloin jo alustavalla suunnitelmalla päästään pitkälle. Hyvällä suunnitelmalla säästetään myös aikaa kiinnitinjärjestelmän kehitysvaiheessa.

Yritykseen tuleva hitsausrobotisolun valmistaja on suomalainen Pemamek Oy. Robotisolun kokoluokka on iso, sillä se sisältää kaksi paikoituslaitteistoa, sekä niiden välillä liikkuvan portaalin (Pemamek, 2024b). Solun asennusleveydeksi tulee noin 19,5 metriä ja syvyydeksi noin 8,3 metriä. Solun kokoon vaikuttaa myös sen raskas rakenne, joka mahdollistaa suurikokoisten teräskappaleiden hitsaamisen. Solu sisältää paikoituslaitteiden lisäksi yhden kannatinyksikön sekä radan, jota pitkin kannatinyksikköä voidaan siirtää.

Hitsausrobotin paikoituslaitteistot eroavat toisistaan siten, että ensimmäinen niistä on kaksiakselinen ja toinen yksiakselinen. Yksiakselinen paikoituslaitteisto edellyttää siihen sopivan työkappaleiden kiinnitinjärjestelmän suunnittelun. Yrityksessä hitsataan valtavasti erilaisia kappaleita, joiden kuormat ja mittasuhteet vaihtelevat todella paljon. Kiinnitinjärjestelmän tulee olla monikäyttöinen sekä riittävän kantava, että siinä voidaan hitsata mahdollisimman monia erilaisia kappaleita.

Työn aloitusvaiheessa robottisolu oli vasta tilauksessa ja sen asennustyöt aloitettiin yrityksessä työn loppuvaiheessa. Työssä suunniteltavan kiinnitinjärjestelmän suunnitteluprosessi pohjautuu valmistajalta saatuihin dokumentaatioihin sekä mekaniikkasuunnitteluun. Työn aloitusvaiheessa tutustuttiin yritykseen tulevaan robottisoluun saatuun dokumentaatioon perehtymällä. Yritykseen tuleva robottisolu on esitettyä kuviossa 1.



Kuvio 1. Yritykseen tilattu hitsausrobottisolu (Pemamek, 2024a).

3.1 Hitsausrobotti

Uuden hitsaussolun robottina tulee toimimaan Yaskawan valmistama MOTOMAN AR1440 teollisuusrobotti, jolla on nimensä mukaisesti 1440 millimetrin ulottuvuus (Yaskawa, 2025). AR1440 on kevytrakenteinen kuusiakselinen monikäyttöinen teollisuusrobotti, jonka hyötypaino on 12 kg ja omapaino 150 kg. Robotin ohjaukseen käytetään Yaskawan YRC1000 ohjainlaitetta, joka yhdistettynä robotin välyksettömiin niveliin tarjoaa todella tarkan 0,02 mm:n toistettavuuden liikkeille. Robotti on varustettu MIG/MAG-hitsauslaitteistolla sekä kameranäöllä, joka mahdollistaa hitsausurien skannaamisen (Pemamek, 2024b). Yaskawa-robottiin on liitetty Pemamekin portaaliyksikköön, joka tarjoaa laajan hitsausulottuvuuden lisäämällä siihen x-, y- ja z-akselien suuntaiset lineaariliikkeet.

3.2 Paikoituslaitteistot

Hitsaussolun paikoituslaitteisto on jaettu kahteen osaan. Ensimmäisenä näistä on L-pöydällä varustettu kaksiakselinen paikoituslaite ja toisena grillityyppinen kannatinyksiköllä varustettu yksiakselinen paikoituslaite. Kahdella erillisellä paikoituslaitteistolla mahdollistetaan robotin tauoton hitsaaminen. Tämä tapahtuu siten, että robotin työskentelytilat jaetaan kahteen valoverhojen avulla. Tällöin robotti voi työskennellä yhdellä paikoituslaitteistolla ja pysähtyy työtilojen väliin, jos toisen paikoituslaitteiston valoverho on katkaistu. Jako mahdollistaa tilanteen, jossa robotilla hitsataan työkappaletta yhdellä paikoituslaitteistolla samalla, kun toiseen paikoituslaitteistoon kiinnitetään seuraavaksi hitsattavaa kappaletta kiinni.

3.2.1 Yksiakselinen paikoituslaitteisto

Grillityyppinen paikoituslaitteisto koostuu itse paikoituslaitteesta sekä kannatinyksiköstä ja sen radasta (Pemamek, 2024b). Paikoituslaitteiston työstöväliä voidaan muuttaa liikuttamalla kannatinyksikköä rataa pitkin tarvittavaan kohtaan. Tällöin voidaan hitsata useita eri mittaisia palkkirakenteita samalla paikoituslaitteistolla aina 13 metrin pituuteen saakka. Paikoituslaitteistot on asennettu soluun samalle askelille.

Yksiakselisen paikoituslaitteen kantavuus on yhteenlaskettuna 40000 kg, joka jakautuu kannatinyksikön sekä paikoituslaitteen kanssa tasan (Pemamek, 2024b). Vääntöä yksiakselisen paikoituslaitteiston paikoituslaitteella on maksimissaan 25000 Nm ja kannatinyksikkö on vapaasti pyörivä. Paikoituslaitteen maksimimomentin edellytyksenä on, että käännettävän työkappaleen ja sen kiinnittimen muodostava painopiste poikkeaa paikoituslaitteen akselilta enintään 165 mm.

3.2.2 Kaksiakselinen paikoituslaitteisto

Kaksiakselisen paikoituslaitteisto koostuu perinteisen paikoituslaitteen lisäksi L-mallisesta pöydästä, joka itsessään sisältää toisen servomoottorin ja pyörityspöydän. Rakenteella mahdollistetaan kaksi pyörivää akselia, joiden avulla hitsattavat kappaleet saadaan todella

moneen erilaiseen asentoon. Näin saadaan hitsattua monipuolisesti eriäviä työkappaleita, joissa hitsausliitoksia tulee moneen eri paikkaan.

Kaksiakselisen paikoituslaitteiston kantavuus on 10000 kg ja työkappaleen maksimipituus 5 metriä (Pemamek, 2024b). Maksimi vääntö paikoituslaitteen ensimmäisellä akselilla on 20000 Nm ja toisella 12000 Nm. Jos L-pöytä on irti ja kappale kiinnitetään suoraan paikoituslaitteen ensimmäiselle akselille, on tällöin sallittu painopisteen etäisyys paikoituslaitteen akselista enintään 200 mm. Kappaleen kiinnitettynä L-pöytään painopisteen poikkeuma akselista saa olla enintään 120 mm

3.3 Tuotekartoitus ja rajaus

Ensimmäisenä kiinnitinjärjestelmän suunnitteluvaiheena on selvittää, mitä eri kappaleita järjestelmään tullaan kiinnittämään. Yrityksen toimihenkilöiden kanssa järjestettiin palaverit, joiden aikana suunniteltiin alustavaa rakennetta kiinnitinjärjestelmälle ja kartoitettiin siinä hitsattavia kappaleita. Yrityksessä hitsattavat kappaleet ovat pääosin rakenneteräksestä koostuvia tuotteita, joiden mittasuhteet ja kuormat ovat hyvin vaihtelevia. Tuotteet koostuvat eri kokoisista levyistä, ainesputkista, profiileista sekä palkeista. Ohutlevyosia valmistetaan yrityksessä satunnaisesti, mutta hitsauksessa nämä ovat harvinaisia eikä oleellisia työn kannalta. Kappaleet silloitetaan kokonaisiksi yrityksen hitsaamossa, josta ne siirtyvät hitsausvaiheeseen.

Valmiiksi silloitettujen kappaleiden hitsaaminen robotissa helpottaa kiinnitinjärjestelmän suunnittelua merkittävästi, sillä kappaleille tarvitaan tällöin vain yleissopiva kiinnitysmenettelmä paikoituslaitteistoon. Kappale voidaan asettaa yhtenäisenä kiinnitysjärjestelmään, joka tekee sen käyttämisestä huomattavasti nopeampaa ja helpompaa. Yksittäisistä osista kokoon hitsattava kappale on merkittävästi monimutkaisempi kiinnittää paikoituslaitteeseen, sillä jokainen osa tulee kiinnittää erikseen ja tukea siten, että oikeat mittasuhteet säilytetään hitsauksen aikana.

Koska robotissa on kaksi paikoituslaitteistoa, jotka tarjoavat hyvin erilaiset paikoitusmahdollisuudet, tulee näiden erot huomioida tuotekartoituksessa. Robottisolussa on yksi kaksiakselinen paikoituslaitteisto ja yksi yksiakselinen paikoituslaitteisto. Kaksiakselinen

paikoituslaitteisto tarjoaa todella monipuoliset paikoitusmahdollisuudet keskikokoisille työkappaleille. Yli 5 metriä pitkien kappaleiden hitsaus ei kuitenkaan ole tällä mahdollista, ja se suoraan rajaa tuotteita yksiakselisen paikoituslaitteiston tehtäväksi. Tulee myös huomioida, että kappaleiden painopiste merkitsee paljon niitä asentaessa paikoituslaitteeseen. Tällöin myös lyhyemmät mutta painoltaan kaksiakselisen paikoituslaitteiston ylikuormittavat kappaleet tulee hitsata yksiakselisella paikoituslaitteella.

Yksiakseliseen paikoituslaitteistoon tullaan kiinnittämään pääsääntöisesti pitkiä kappaleita (yli 5 metriä) tai useampia lyhyempiä, joiden kuormat ylittävät yksinään tai yhdistettynä 4000 kg. Pienempiä ja kevyempiä kappaleita voidaan hitsata hyvin solun toisessa paikoituslaitteistossa tai yrityksen vanhalla robotilla. Kiinnitinjärjestelmää suunnitellessa olisi hyvä silti mahdollistaa pienempienkin kappaleiden kiinnitys. Suuren tilausmäärän tai toisen robotin huoltokatkon sattuessa olisi ihanteellista pystyä hitsaamaan pienempiäkin tuotteita yksiakseliseen paikoituslaitteeseen kiinnitettynä. Tämä ei ole kuitenkaan kiinnitinjärjestelmän päätehtävä, joten suunnittelu pienempien työkappaleiden kiinnittämiseksi voidaan toteuttaa tulevaisuudessa esimerkiksi järjestelmään luodun lisäosan avulla.

3.4 Robotin rakenteen ja ulottuvuuden vaikutus kiinnitinjärjestelmän suunnitteluun

Robotin ulottuvuudella sekä rakenteella on merkittävä vaikutus siihen, millainen kiinnitinjärjestelmä paikoituslaitteistoon voidaan suunnitella. Yritykseen tulevassa robotissa on noin 9 metriä pitkä työskentelytila yksiakselisella paikoituslaitteistolla. Paikoituslaitteisto on toteutettu yhdellä paikoituslaitteella sekä vapaasti pyörivällä kannatinyksiköllä. Paikoituslaitteen pyörivä akseli on kiinteästi tuettu, jolloin akselin laskeminen lähemmäksi lattiatasoa ei ole mahdollista. Pyörivä akseli on 2,5 metrin korkeudella lattiatasosta, joka mahdollistaa suunniteltavalle kiinnitinjärjestelmälle epäkeskeisen rakenteen. Epäkeskeisellä rakenteella työkappaleiden kiinnityspistettä voidaan tuoda alaspäin järjestelmän ollessa vaakatasossa. Tämä mahdollistaa korkeiden työkappaleiden kiinnityksen järjestelmään. Lisäksi matalammalla sijaitsevat kiinnityspisteet tekevät työkappaleen kiinnityksestä helpompaa työntekijöille.

Paikoituslaitteisto tuo korkeuden lisäksi muitakin rakenteellisia rajoitteita. Näistä oleellisin on paikoituslaitteen kääntöliikkeen maksimivääntö 25000 Nm. Kuormaa paikoituslaite kestää 20000 kg mutta tämän ehtona on, että kuorman painopiste on maksimissaan tietyllä säteellä paikoituslaitteen pyörähdysakselista. Robotin valmistajan tarjoamissa dokumenteissa maksimietäisyydeksi oli ilmoitettu aikaisemmin mainittu 165 mm. Tätä ei voitu kuitenkaan pitää paikkaansa pitävänä, sillä robotin saapuessa yritykselle paikoituslaitteeseen asennetussa diagrammissa ilmoitettu maksimietäisyys pyörähdysakselista 20000 kg kuormalla oli lähempänä 120 mm. Tietojen ristiriidasta oltiin yhteydessä robotin valmistajaan, mutta tiedosta ei saatu varmistusta selvityspyynnöstä huolimatta. Teoreettinen maksimietäisyys kyseiselle kuormalle laskettiin kuitenkin itse hyödyntäen momenttitasapainon kaavaa.

Kannatinyksikön rakenne tuo lisää rajoitteita kiinnitinjärjestelmän suunnittelussa. Kannatinyksikön yläpäässä on kaksi 200 mm halkaisijan teräsrullaa, joiden päälle asetetaan kiinnitinjärjestelmän päähän asennettu 200 mm halkaisijan teräsputki. Tällöin putken akseli on paikoituslaitteen akselin kanssa samassa linjassa. Rakenne tukee kiinnitinjärjestelmää vain alapuolelta sekä sivuttaissuuntaisesti. Teräsputken on tällöin mahdollista taipua vapaasti kiinnitinjärjestelmän rungon mukana. Toisin kuin paikoituslaitteessa, kannatinyksikön rakenne ei luo useasta eri suunnasta tukevaa kiinnityspistettä.

Kannatinyksikön maksimikuorma on valmistajan mukaan 20 000 kg. Valmistaja ei kuitenkaan tarjonnut tietoja kannatinyksikön sivuttais- tai pitkittäissuuntaisten kuormitusten rajoihin selvityspyynnöstä huolimatta. Teknisissä dokumenteissa on ilmoitettu, että kannatinyksikön tarkoitus on kaksinkertaistaa paikoituslaitteen maksimikuorma 40 000 kiloon saakka. Voidaan olettaa, että kannatinyksikön tulisi kestää vähintään samoja kuormituksia mihin itse paikoituslaite on suunniteltu. Työturvallisuuden kannalta oletus kannatinyksikön kestävydestä on riski. Asiasta keskusteltiin yrityksen toimihenkilöiden kanssa ja päätettiin, että luotetaan toistaiseksi valmistajan tarjoamaan tietoon ja sen pohjalta tehtyyn oletukseen.

Robotin ulottuvuudella on myös iso vaikutus kiinnitinjärjestelmän suunnitteluun. Järjestelmästä on turhaa tehdä sellainen, missä kiinnitettävien työkappaleiden hitsausseamat siirtyvät ulottuvuuden ulkopuolelle. Valmistaja ei ole ilmoittanut robotin maksimiulottuvuutta portaaliin kiinnitettynä, mutta tämä voidaan laskea portaalin liikkeiden ääriasennoista

yhdistämällä niihin robotin ulottuvuuskuvaajasta saadut mittasuhteet. Ulottuvuutta tarkasteltiin piirtämällä sen kuvaajan mittasuhteet solun piirustuksiin. Piirustuksista voitiin todeta, että robotin ulottuvuus riittää 766 mm korkeudelle lattiatasosta. Tulee huomioida, että kiinnitinjärjestelmä voi itsessään alittaa tämän, mutta siihen kiinnitettävien työkappaleitten ei tule asettua tämän rajan alapuolelle. Kiinnitinjärjestelmään kiinnitettävien työkappaleitten tulee olla sopivasti ulottuvuuden rajan sisäpuolella siten, että robotin ääriasennossa on riittävästi varaa liikkuu vaikeita hitsausasumia kohdatessa. Tällöin hitsausrobotin käsivartta ei tarvitse ajaa täysin suoraksi ojennettuna.

Kiinnitinjärjestelmän suunnittelussa tulee huomioida ulottuvuuden lisäksi myös portaalin liikerata ja sen etäisyys paikoituslaitteistoon nähden. Piirustuskuvista selvittämällä voidaan todeta, että ensimmäiseksi rajoittavaksi tekijäksi tässä tapauksessa tulee portaalin y-akselin puomi. Paikoituslaitteen 2,5 metrin säde mahdollistaa tilanteen, jossa joko kiinnitinjärjestelmä tai siihen asennettu hyvin korkea työkappale osuu portaaliin. Rajoitteena tämä on kuitenkin täysin riippuvainen kiinnitinjärjestelmän mittasuhteista sekä työkappaleen korkeudesta. Yrityksessä ei tulla hitsaamaan niin korkeita kappaleita, että tämä muodostuisi rajoitteeksi. Jos kiinnitinjärjestelmä tehdään kuitenkin mahdollisen epäkeskoiseksi, on törmäys täysin mahdollista. Tämä kuitenkin edellyttää, että järjestelmä on ensinnäkin hyvin epäkeskoinen ja se on käännettynä lähes ylösalaisin.

3.5 Rungon suunnittelu

Kiinnitinjärjestelmän suunnittelu aloitettiin kerättyjen tietojen pohjalta. Yrityksen kannalta paras vaihtoehto kiinnitinjärjestelmäksi on yleismallinen grillityyppinen järjestelmä, joka mahdollistaa useiden erilaisten kappaleiden kiinnittämisen samaan järjestelmään. Paikoituslaitteiston kiinteän rakenteen vuoksi rakenne päätettiin toteuttaa epäkeskoisesti, jolloin voidaan hyödyntää robotin maksimiulottuvuutta. Lisäksi mahdollistetaan korkeiden kappaleiden hitsattavuus ja parempi työskentelykorkeus. Kiinnitinjärjestelmän perustaksi päätettiin suunnitella runko, joka kannattelee hitsattavaa työkappaletta sekä niiden kiinnitystarvikkeet. Runko tulee kokemaan hyvin monipuolisia rasituksia käytön aikana, jonka takia rungossa käytettävien profiilien valinta on tärkeä osa suunnitteluvaihetta.

Rungossa käytettäväksi profiileiksi valittiin EN 10219 -standardin mukaiset rakenneputket, sillä niiden avulla toteutettu rakenne on kustannustehokas ja tarjoaa hyvät lujuusominaisuudet (Ongelin & Valkonen, 2012, s. 12). Rakenneputkilla on suljetun poikkileikkauksen ansiosta hyvä kiepsautus- sekä nurjahduskestävyys. Symmetrisen poikkileikkauksen ansiosta profiilin taivutus- sekä vääntöjäykkyys on erinomainen. Profiilien ominaisuudet tekevät runkorakenteiden suunnittelusta paljon yksinkertaisemmän prosessin verrattuna avoimen poikkileikkauksen profiileihin. Suuri tekijä SHS-rakenneputkien valinnassa kiinnitinjärjestelmän runkoprofiileiksi on profiilien lujuuden symmetrisyys kuormitusten vaihtaessa suuntaa. EN 10219 -standardin mukaiset rakenneputket soveltuvat myös mainiosti käytettäväksi tietokoneavusteisessa lujuuslaskennassa.

Rakenneputkien liittäminen toisiinsa on helposti toteutettavissa, sillä putket ovat hitsattavuudeltaan hyviä. Ne eivät edellytä esilämmitystä ainevahvuuden ollessa yhtä suuri tai pienempi kuin 12,5 mm (Ongelin & Valkonen, 2012, s. 481). Runkoprofiilien väliset hitsausaummat voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Koska kiinnitinjärjestelmän runko tulee kokemaan hyvin vaihtelevia ja monipuolisia kuormituksia, liitokset päätettiin toteuttaa läpihitsatuilla päittäishitsillä. Standardin SFS-EN 1993-1-8 (Suomen Standardisoimisliitto (SFS), 2005, s. 48) mukaan läpihitsatut päittäishitsit voidaan olettaa kestävyydeltään yhtä suureksi, kuin hitsauksessa liitettävän heikoimman osan kestävyys. Ehtona kuitenkin on, että hitsauksessa käytetään sopivaa lisäainetta, jotta liitoksen kestävyys on perusaineen vertainen.

Runko pitää vielä itsessään kiinnittää paikoituslaitteistoon, ja tämä edellyttää kiinnityspisteiden suunnittelua. Paikoituslaitteen päätyyn suunniteltiin paikoituslaitteen pöytälevyn kiinnittyvä levyosa, joka vastaa voimien siirtymisestä kiinnitinjärjestelmän runkoon. Levyn ainevahvuus valittiin samaksi paikoituslaitteen pöytälevyn vahvuudeksi. Paikoituslaitteen pääty rungosta suunnitellaan siten, että siihen liitettävä levy asettuu profiilien muodostaman neliömäisen rakenteen päälle tasan. Levy kiinnitetään runkoon hitsaamalla se rakenneputkien ulko- sekä sisäreunalta siten, että liitos kiertää putkien reunojen muodostaman kierroksen koko matkalta. Tällöin levyyn muodostuva vetävä voima siirtyy profiilien poikkileikkaukseen nähden symmetrisesti. Levyyn porataan 8 reikää paikoituslaitteen ruuviitoksen muodostamiseksi. Kannatinyksikön päätyyn rakenneputkeen porataan reikä 200 mm halkaisijan teräsputkelle, joka hitsataan rakenneputkeen kiinni molemmilta puolelta putkea.

Molemmat kiinnityspisteet suunniteltiin S355 rakenneteräksestä, joka vastaa rakenneputkien materiaaliominaisuuksia.

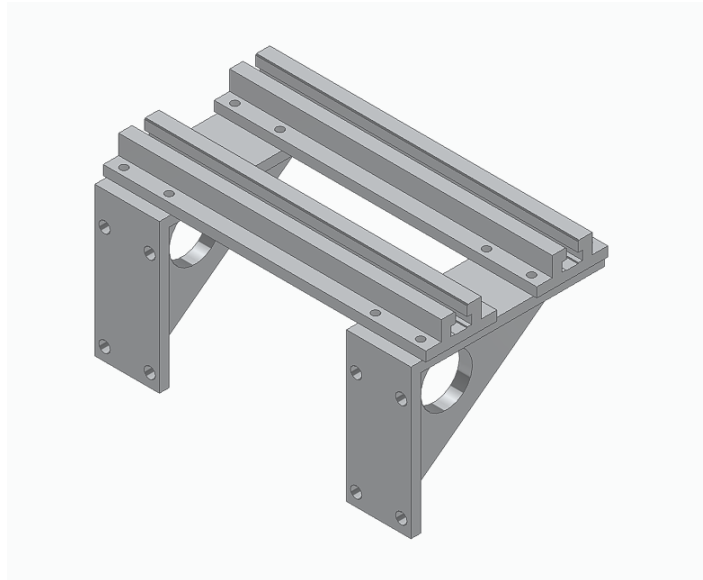
3.6 Työkappaleiden kiinnitys runkoon

Työkappaleiden kiinnitys runkoon on tärkeä osa kiinnitinjärjestelmän kokonaisuutta. Järjestelmän avulla on tarkoitus hitsata monia erilaisia työkappaleita, joiden kiinnittäminen olisi hyvä mahdollistaa lähtökohtaisesti samoilla kiinnittimillä. Tuotekohtaiset kiinnitinosat tulee minimoida, jotta kustannukset saadaan pidettyä alhaisina ja vältetään kankeilta sekä epäkäytännöllisiltä kiinnittimiltä. Kaikilta tuotekohtaisilta kiinnitysosilta ei voida kuitenkaan luopua, sillä robottihitsauksen edellytyksenä on, että uudelleen hitsattavat työkappaleet saadaan kiinnitettyä lähes samaan paikkaan ilman hitsausohjelman muuttamista. Järjestelmää varten suunniteltavat kiinnittimet tulee jaotella tällöin kahteen osaan: järjestelmän peruskiinnikkeisiin sekä tuotekohtaisiin kiinnityksiin.

Järjestelmässä käytettävät peruskiinnikkeet suunniteltiin modulaarisiksi, jotta niiden paikka on helppo vaihtaa tarpeen vaatiessa. Peruskiinnittimien paikan vaihtomahdollisuus on oleellinen osa kiinnitinjärjestelmän toimintaperiaatetta, koska sen avulla mahdollistetaan erilaisten työkappaleiden kiinnittäminen järjestelmään niiden määrästä tai geometriasta huolimatta. Peruskiinnikkeiden rakenne koostuu kahdesta S355 rakenneteräksestä valmistetusta kulmaraudasta, jotka kiinnittyvät ruuviliitoksella runkoon. Kulmarautojen päälle asennetaan kaksi ISO 299:1987 -standardin mukaan toteutettua t-urakiskoa ruuviliitoksella. T-urakiskot tarjoavat todella monipuoliset kiinnitysmahdollisuudet. Kiskojen avulla voidaan hyödyntää yrityksessä ennestään olevia t-urakiinnittimiä sekä perinteisiä puristimia. Tuotekohtaiset kiinnitysosat voidaan kiinnittää t-urakiskoihin helposti ruuviliitännällä.

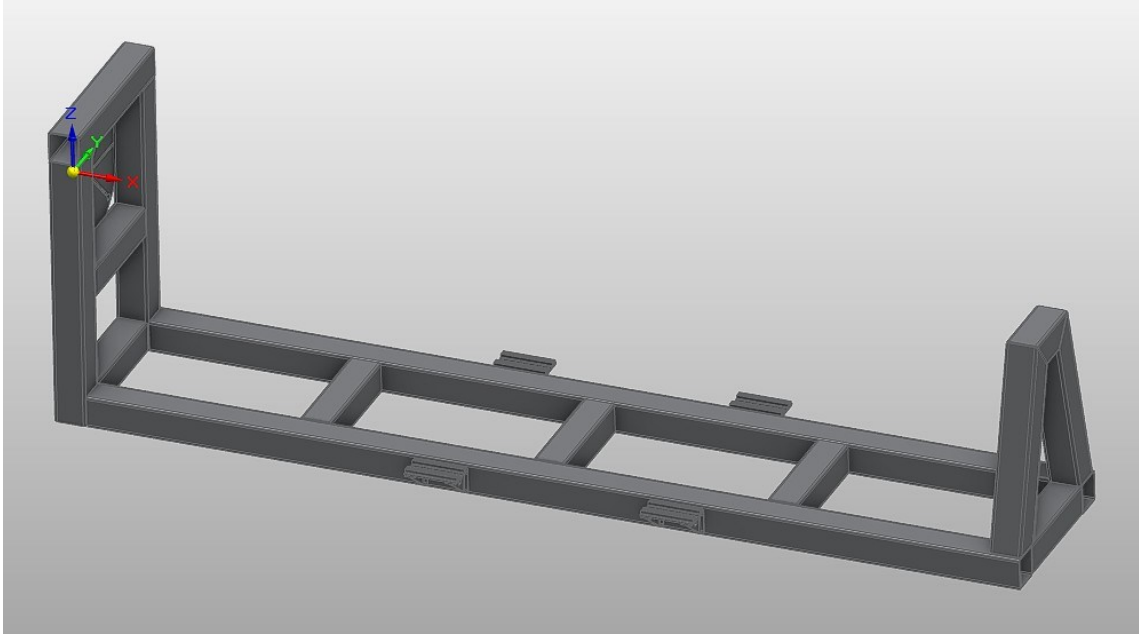
3.7 Kiinnitinjärjestelmän alustava CAD-mallinnus

Kiinnitinjärjestelmästä luotiin karkea malli hyödyntäen Siemensin SolidEdge Student Edition 2024 CAD-ohjelmaa (Siemens, 2024). CAD-mallin luominen järjestelmästä aloitettiin ohjelman Frame-ympäristössä, jossa mallinnettiin rungon rakenneputket sekä niiden liitoskohtien muoto. Rungon malli siirrettiin Frame-ympäristöstä SolidEdgen Assembly-ympäristöön muutamalla runkoprofiilit part-tiedostoiksi. Assembly-ympäristö mahdollistaa runkoprofiilien yksityiskohtaisen muokkauksen sekä niihin kiinnitettävien peruskiinnikkeiden lisäämisen kokoonpanoon. Peruskiinnikkeet mallinnettiin SolidEdgen perinteisessä part-ympäristössä, josta saadut CAD-mallit liitettiin osaksi kiinnitinjärjestelmä Assembly-ympäristöä. Kuviossa 2 on esitettyä peruskiinnikkeiden alustava CAD-malli



Kuvio 2. Alustava CAD-malli kiinnitinjärjestelmän peruskiinnikkeistä.

Alustavan kokonaisuuden mallinnettua yhteiseen Assembly-ympäristöön, kiinnitinjärjestelmään yhdistettiin asianmukaiset materiaaliominaisuudet. Tällöin järjestelmän rungosta ja peruskiinnittimistä saadaan tietoa järjestelmän kokonaispainosta sekä painopisteen sijainnista. Alustavaan malliin sovitettiin myös yrityksestä saatuja CAD-malleja työkappaleista, joita kiinnitinjärjestelmään on tarkoitus kiinnittää tulevaisuudessa. Kuviossa 3 on esitettyä ensimmäinen alustava CAD-kokoonpano kiinnitinjärjestelmästä



Kuvio 3. Alustava CAD-kokoonpano kiinnitinjärjestelmästä.

Yksityiskohtaisella CAD-mallilla on iso merkitys projektin kannalta, sillä sen avulla tullaan suunnittelemaan tuotekohtaisia kiinnitysosia yritykselle. Tämän lisäksi mallia tullaan hyödyntämään hitsausrobotin etäohjelmoinnissa. Etäohjelmointia varten on tärkeää, että tuotteesta sekä sen kiinnitysmenetelmästä on riittävän yksityiskohtainen CAD-malli, jonka avulla voidaan luoda hitsausrobotille toimiva hitsausohjelma. Alustava CAD-malli ei tietenkään ole riittävä kyseiseen käyttötarkoitukseen, jonka takia järjestelmää ja siitä tehtävää CAD-mallia tulee kehittää riittävälle tasolle saakka. Tämä toteutettiin lujuuslaskennan sekä rajoitteiden konkretisoinnin avulla.

4 KIINNITINJÄRJESTELMÄN KUORMITUSTEN MÄÄRITTELY

Kiinnitinjärjestelmää suunnitellessa isossa osassa on massoista syntyvien kuormitusten määrittely, jotta työn aikana suoritettavat lujuuslaskennat voidaan toteuttaa oikeaoppisesti ja tarkasti. Kiinnitinjärjestelmän monipuolinen kuormitus sekä rakenne tekee voimien tarkastelusta monimutkaisen prosessin eikä jokaista yksittäistä kuormitustilannetta ole kannattavaa laskea erikseen. On huomattavasti tehokkaampaa rajata kuormitusten avulla kiinnitinjärjestelmän käytön aikana muodostuvat ääritilanteet. Ääritilanteista voidaan muodostaa tarvittavat laskelmat ja olettaa, kun kiinnitinjärjestelmä kestää ääritilanteet, kestää se myös kaikki tilanteet laskettuun ääritilanteeseen saakka ja muut siihen verrattavissa olevat tilanteet. Ääritilanteiden määrittämiseksi tulee ymmärtää mistä rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset syntyvät. Kuormitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi järjestelmän mitasuhteet sekä massa. Myös järjestelmän painopisteellä on merkittävä vaikutus voimien syntymiseen. Näiden lisäksi kiinnitettävien työkappaleiden massalla sekä painopisteen sijainnilla on valtava vaikutus järjestelmään kohdistuvien kuormitusten kannalta. Rakenteen tasapaino edellyttää tukireaktioita, jotka vaikuttavat siihen, millä tavalla kuormituksista syntyvät rasitukset jakautuvat rakenteessa.

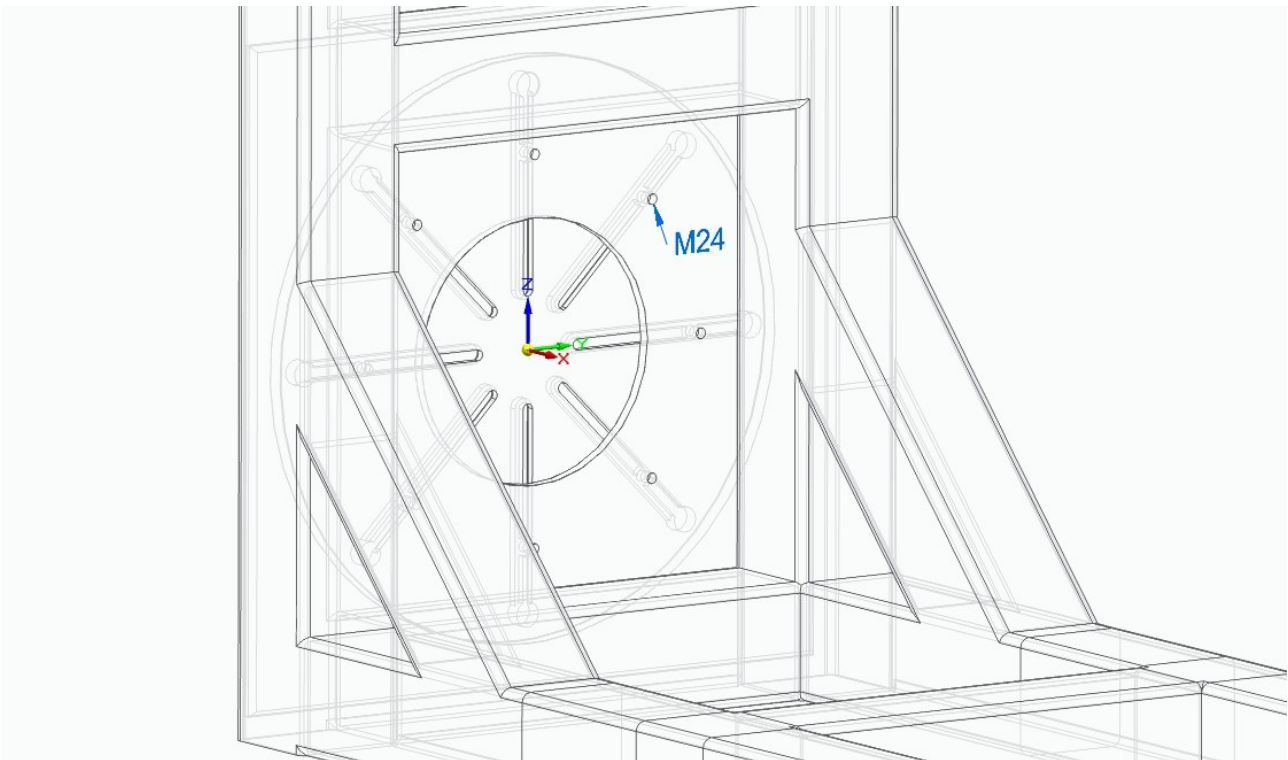
Kuormitukseen vaikuttaa myös esimerkiksi työkappaleiden kiinnitys sekä kohdistusmenetelmät. Tämä johtuu siitä, että vaikka kiinnittimet on suunniteltu yleismallisiksi, työkappaleet silti edellyttävät tiettyjä tuotekohtaisia lisäosia kiinnitystä varten. Lisäosien tuomat massat voidaan kuitenkin jättää huomioimatta, kun kiinnitinjärjestelmä suunnitellaan sopivan varmuuskertoimen avulla. Edellytyksenä on kuitenkin, että lisäosien massat pysyvät maltillisina. Poikkeuksellisen suurien lisäosien luomat kuormitukset tulee laskea tapauskohtaisesti. Työkappaleiden läpi kulkeutuu myös osa kuormituksen aiheuttamasta rasituksesta, joka muuttaa kuormitustilannetta. Tämä on kuitenkin hyvin tapauskohtaista eikä kasvata kiinnitinjärjestelmän kokemia rasituksia, jolloin sitä ei ole kannattavaa sisällyttää laskentaan.

Koska kiinnitinjärjestelmään kohdistuviin kuormituksiin ja niistä syntyviin rasituksiin on niin paljon erilaisia vaikuttavia tekijöitä, tulee niitä tarkastella useasta eri staattisesta näkökulmasta. Tällöin saadaan kattava kokonaiskuva siitä, millaisia kuormituksia sekä rasituksia muuttajat saavat aikaan. Järjestelmää käännettäessä on kuitenkin selvää, että liikkeen

alkaessa järjestelmä sekä siihen kiinnitettävä työkappale kokee väistämättä tietynlaista kiihtyvyyttä. Kiihtymisen tuomia lisäkuormituksia ei voida jättää huomioimatta, sillä ne vaikuttavat suoraan kiinnitinjärjestelmään kohdistuviin kokonaiskuormituksiin. Kiihtyvyyden tuomia lisäkuormituksia voidaan tarkastella dynaamisesta näkökulmasta.

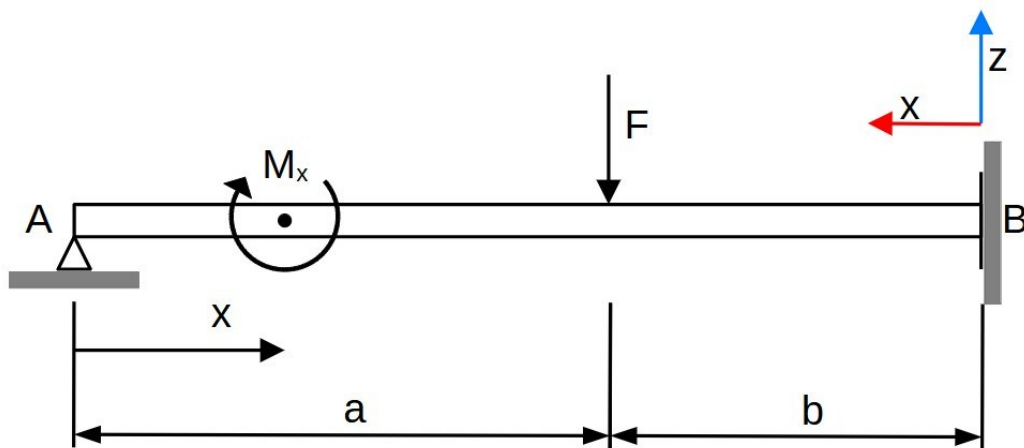
4.1 Tukireaktioiden määrittely

Järjestelmä kiinnitetään paikoituslaitteen pöytälevyyn ruuviliitoksella, jolloin paikoituslaitteen puoleinen pääty kiinnitinjärjestelmästä ei pääse liikkumaan eikä pyörimään z- tai y-akselin suuntaisesti. Liike myös x-akselin suuntaisesti on rajoitettu. Paikoituslaitteen pääty sallii kuitenkin x-akselin mukaisen pyörähdysliikkeen, jota hallitsee laitteen kääntömekanismi. Kannatinyksikön rakenne muodostaa palloniveleen verrattavissa olevan tukireaktion. Tukireaktio estää liikkeet z- ja y-akselilla sallien kuitenkin pyörähtämisen y-akselin mukaisesti. Kannatinyksikön luoma tukireaktio sallii myös liikkeen sekä pyörähdyksen x-akselin mukaisesti.



Kuvio 4. Kiinnitinjärjestelmän paikoituslaitteen kiinnityskohta.

Paikoituslaitteen kiinnitys tapahtuu kahdeksalla M24-pultilla, jotka muodostavat tukevan kiinnityspisteen. Liitos on sen verran tukeva, että se on verrattavissa kiinteään tukipisteeseen. Liitoskohta paikoituslaitteen pöytälevyyn on esitetty kuviossa 4. Kannatinyksikön muodostama tukireaktio sisältää tietyn määrän kitkavoimaa ja rullien kaarevuuden takia pinta-ala, jossa kitkavoima syntyy, on hyvin pieni. Pienikokoinen pinta-ala tekee syntyneestä kitkavoimasta aika merkittävän. Kitkasta aiheutunut voima voidaan joka tapauksessa rajata laskelmista pois, sillä rullien päällä lepäävä teräsputki vaihtaa paikkaa taipumalla kiinnitinjärjestelmän rungon mukana eikä rullien päällä liukumalla. Havaintojen pohjalta voidaan todeta, että rungon kuormitusilannetta voidaan verrata päästä tuetun ulokepalkin tilanteeseen.



Kuvio 5. Vapaakappalepiirros tuetun ulokepalkin tilanteesta.

Tuetun ulokepalkin rasitusten jakautuminen on täysin riippuvainen palkin pituudesta sekä kuormituksen sijainnista palkin pituussuuntaan nähden. Koska pallonivel ei rajoita kiinnitinjärjestelmän runkoon kohdistuvaa vääntöä lainkaan, kohdistuu tämä momentti rungon rakenteeseen sekä paikoituslaitteen pöytälevyyn. Vääntömomentin lisäksi tukireaktioiden luomat tukivoimat ovat riippuvaisia massakeskipisteen sijainnista ja kiinnitinjärjestelmän pituudesta. Tilannetta on havainnollistettu kuviossa 5.

4.2 Ääritilanteiden määrittely

Kiinnitinjärjestelmään kohdistuvien kuormitusten yhteisvaikutuksia tarkastelemalla ääritilanteet voidaan jakaa kuuteen osaan. Kaksi pääosaa muodostuu paikoituslaitteiston luomista tukireaktioista. Koska runko sekä paikoituslaitteen pöytälevy ottaa vastaan kaiken kuormituksista syntyvän väännön, voidaan olettaa, että runkoon sekä paikoituslaitteeseen

kohdistuva vääntö saavuttaa tietyt ääriarvot painopisteen ollessa tietyssä kohtaa x-akselia. Nämä muuttuvat painopisteen siirtyessä epäsymmetrisesti. Voidaan todeta, että pelkään paikoituslaitteiston luomista tukireaktioista muodostuu kaksi tarkasteltavaa ääritilannetta, joissa runko ja pöytälevy kokevat suurimmat vääntömomentit. Näiden lisäksi paikoituslaitteen kääntöliike muodostaa omat ääritilanteet, jotka on toistettava tukireaktioista muodostuvissa ääritilanteissa.

Kiinnitinjärjestelmän ollessa vaakatasossa eli 0-asteessa, kohdistuu sen rakenteeseen vääntöä ja suoraviivaisia tukivoimia. Järjestelmän runkoprofiileissa on tällöin vetäviä sekä taivuttavia voimia. Järjestelmän ollessa käännettynä täysin ympäri, rungossa on edelleen vain vääntäviä sekä suoraviivaisia tukivoimia, mutta profiilien vetävä voima on muuttunut puristukseksi. 180-asteen tilanne on verrattavissa 0-asteen kokonaiskuormitusten kannalta, joten sitä ei tarvitse erikseen laskea. Kiinnitinjärjestelmän ollessa 90-asteen kulmassa suoraviivaisten tukivoimien lisäksi työkappaleen painopisteen vipuvarsi luo rungon pituusakselin ympäri vaikuttavan vääntömomentin. Tämä on havainnollistettu myöhemmin lujuuslaskentaluvun 5 kuviossa 11. Tilanteessa yksi puoli runkoprofiileista kokee vetävää voimaa ja toinen puoli puristavaa voimaa. 45-asteen kulma aiheuttaa järjestelmälle kaikista monipuolisemman tilanteen kääntöliikkeen aikana. Tällöin suoraviivaisten tukivoimien sekä vääntömomentin lisäksi runko kokee vinosti kuormittavia voimia.

Havaintojen pohjalta ääritilanteet jaotellaan kahteen pääluokkaan ja kolmeen alaluokkaan muodostaen yhteensä 6 eri tilannetta, jossa kiinnitinjärjestelmään muodostuvia kuormituksia tulee tarkastella. Näiden staattisten tilanteiden lisäksi kokonaisuutta tarkasteltaessa huomioidaan myös kiihtyvyydestä muodostuvan hitausmomentin sekä painopisteen epäkeskoisuuden tuomat lisämuutokset kuormituksiin. Ääritilanteiden kuormitusten selvittämisellä saadaan hyvä kuva rungon käyttäytymisestä, jonka pohjalta voidaan tulevaisuudessa arvioida esimerkiksi tilanteita, jossa kiinnitinjärjestelmä irrotetaan ja isokokoinen työkappale kiinnitetään suoraan paikoituslaitteistoon itsekantavalla periaatteella.

5 KUORMITUSTEN JA RASITUSTEN LASKENTAMENETELMÄT

Paikoituslaitteiston tukireaktiot, rungon rakenne sekä siihen kohdistuvat kuormitukset luovat todella monipuolisia rasituksia, joiden laskeminen täysin manuaalisesti perinteisillä lujuuslaskennan menetelmillä luo todella paljon työtä. Manuaalista lujuuslaskennan määrää kevennettiin työssä hyödyntämällä elementtimenetelmää rasitusten tarkastelun ja laskennan nopeuttamiseksi. Elementtimenetelmällä voidaan analysoida kiinnitinjärjestelmässä muodostuvia rasituksia eri tilanteissa nopeasti. Rungon käyttäytymisen visualisointi nopeuttaa kuormitusten tarkastelua ja keventää manuaalisesti suoritettavaa lujuuslaskentaa huomattavasti. Elementtimenetelmää voidaan hyödyntää myös kiinnitinjärjestelmän rakenteen kehittämisessä. Tarkka lujuuslaskenta elementtimenetelmää hyödyntäen edellyttää kuitenkin riittäviä perinteisiä lujuusopin laskentoja, joiden avulla määritetään esimerkiksi rakenteessa syntyvien voimien komponentit.

5.1 Perinteinen lujuuslaskenta

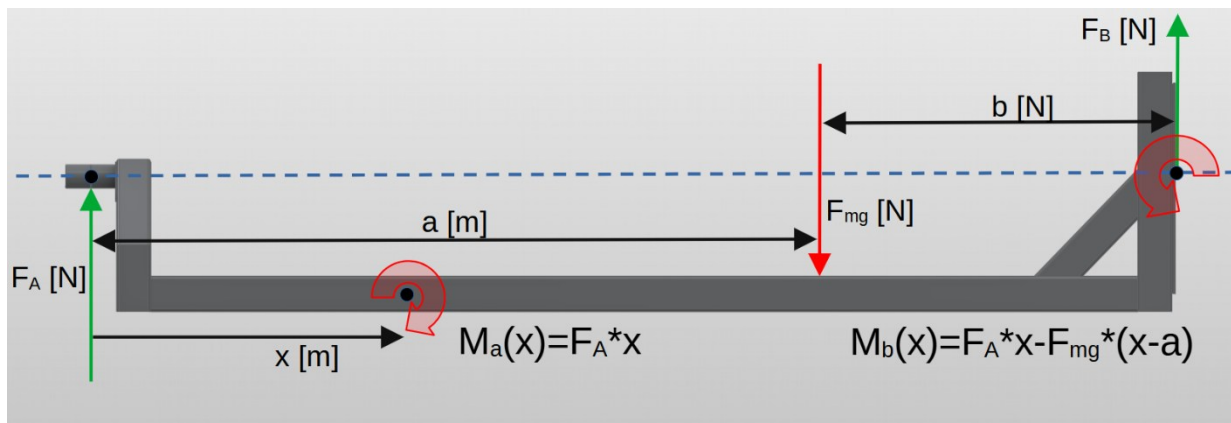
Perinteistä lujuuslaskentaa lähestyttiin statiikan näkökulmasta, johon lisättiin tilanteen kannalta oleellisia dynamiikan laskelmia. Laskujen avulla selvitetään tapauskohtaisesti rungossa syntyviä voimien komponentteja. Rungon käyttötarkoituksen takia tämä osoittautui alussa haasteelliseksi, sillä muuttujien määrä oli suuri. Laskumenetelmiä suunniteltaessa huomattiin nopeasti, ettei tilanteita ole kannattavaa tarkastella yksittäisten laskentojen avulla. Jotta eri tilanteiden kuormituksia saataisiin laskettua nopeasti, päädyttiin tätä varten luomaan tapauskohtaisia laskentatyökaluja.

Lujuuslaskentaa varten päädyttiin luomaan Excel-taulukkoon automatisoidut funktioiden laskentatyökalut, joiden avulla voidaan laskea eri tilanteista muodostuvia kuormituksia sekä vääntömomentteja muuttujien arvoa vaihtamalla. Laskentatyökalujen avulla löydetään nopeasti muuttujien arvot, joilla runkoon muodostuvat kuormitukset ovat suurimmillaan. Laskentatyökalut mahdollistavat eri ääritilanteiden kuormitusten laskemisen, joita voidaan hyödyntää elementtimenetelmää käyttäessä. Tulosten avulla voidaan myös luoda erilaisia kuvaajia kuvastamaan esimerkiksi massojen suuruuden sekä niiden painopisteiden etäisyyden suhdetta, joiden avulla voidaan nopeuttaa uusien työkappaleiden tuomista

robotille huomattavasti. Laskentatyökalujen tueksi luotiin useita eri vapaakappalekuvioita ääritilanteista LibreOffice-ohjelmistolla.

5.1.1 Painopisteen sijainnin vaikutus x-akselilla

Rungon kestävyuden kannalta oli tärkeää selvittää painopisteen muodostama kuormitus kiinnitinjärjestelmään painopisteen vaihtaessa paikkaa pituussuunnassa x-akselin mukaisesti. Tämä johtuu paikoituslaitteiston muodostamista epäsymmetrisistä tukireaktioista, joiden takia järjestelmän runkoon kohdistuva vääntö vaihtaa suuntaa tietyssä kohtaa runkoa riippuen painopisteen sijainnista. Suunnan muutos tapahtuu, koska tukireaktio B kohdistaa rungossa muodostuvan väännön paikoituslaitteen pöytälevyyn. Rungossa syntyvää vääntöä vastustaa ainoastaan rungon rakenne sekä paikoituslaitteiston kiinteä ruuviliitos pöytälevyyn. Voidaan siis todeta, että on olemassa pisteet, joissa runkoon sekä paikoituslaitteeseen kohdistuva vääntö on suurimmillaan.



Kuvio 6. Vapaakappalekuvio kiinnitinjärjestelmään kohdistuvista kuormituksista painopisteen siirtyessä pyörähdysakselin x pituussuuntaisesti.

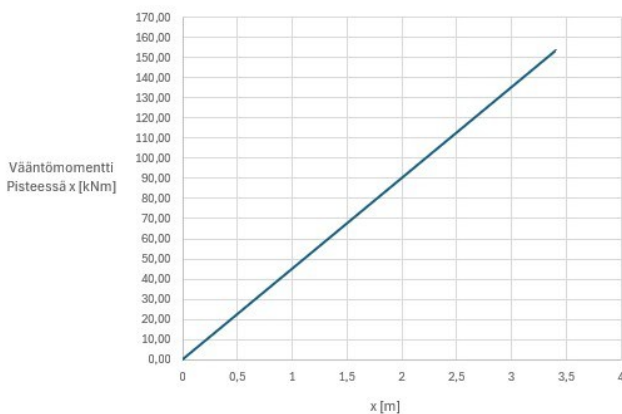
Kuviossa 6 on esitetty sivusta katsottuna massan luoma voima F_{mg} [N] sekä tukireaktiot F_a [N] ja F_b [N]. Tukireaktio F_a kuvastaa kannatinyksikön luomaa pallomaista tukiniveltä ja F_b kuvastaa paikoituslaitteen luomaa kiinteää tukipistettä. Mitta-arvoilla a ja b kuvastetaan painopisteen etäisyyttä tukireaktioista ja x :llä lasketun vääntömomentin etäisyyttä tukireaktiosta F_a . Kuvaan on merkitty vääntömomenttien vaikutus rungossa sekä paikoituslaitteen kiinnityspisteessä punaisilla kaarevilla nuolilla.

Excel-tiedoston ensimmäiselle välilehdelle luotiin laskentatyökalu, jonka muuttujiksi valittiin kokonaispainon muodostama voima F_{mg} [N], painopisteen etäisyys paikoituslaitteen

kiinnityspisteestä b [m], rungon pituus [m] ja painopisteen sijainti kannatinyksiköstä a [m]. Rungon pituus määrättiin manuaalisesti, ja sen avulla voitiin laskea a mitta automaattisesti b -mittaa muuntamalla. B -mittaa sekä kokonaismassan muuttamista varten Excel-pohjaan lisättiin kehitystyökaluista askelpainikkeet arvojen muuttamisen nopeuttamiseksi.

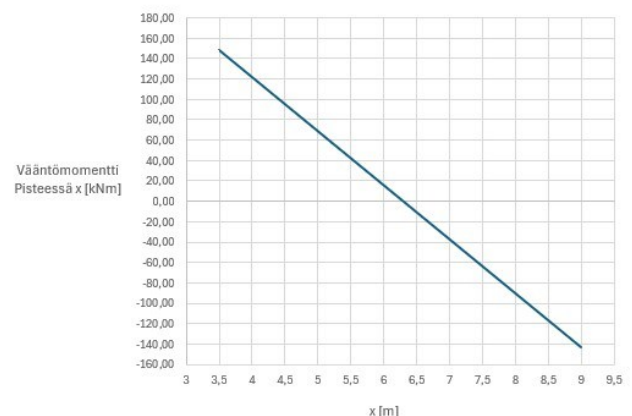
Momentti laskettiin jokaisessa x :n kohdassa kannatinyksikön suunnasta lähtien $0,1$ m porrastuksella aina paikoituslaitteen kiinnityspisteeseen saakka. Momentin laskemiseen käytettiin kahta eri kaavaa, sillä x -arvon ylittäessä a -arvo, vääntömomentti kääntyy toisen suuntaiseksi. Tuloksia varten luotiin kaksi taulukkoa, jotka erotettiin painopisteen sijainnin mukaisesti. Taulukoiden tulokset päivittyvät automaattisesti kokonaispainoa sekä b -mittaa muuntamalla, ja niiden avulla voidaan helposti laskea runkoon ja paikoituslaitteeseen kohdistuva vääntömomentti missä tahansa pisteessä x valitulla kokonaispainolla. Taulukoiden tulosten visualisoinniksi luotiin myös erilliset kuvaajat, jotka päivittyvät taulukoiden mukana automaattisesti. Kyseiset kuvaajat on esitetty kuvioissa 7 ja 8.

Momentin suhde painopisteen sijaintiin x varrella a



Kuvio 7. Runkoon kohdistuva väännön suuruus pisteessä x .

Momentin suhde painopisteen sijaintiin x varrella b



Kuvio 8. Runkoon kohdistuvan väännön suuruus ja suunnan vaihtuminen pisteessä x .

Laskentatyökalun avulla oli helppo määrittää suurimmat kuormituspisteet paikoituslaitteen sekä rungon kannalta. 9 metrin kokonaispituudella suurin vääntömomentti runkoon kohdistui painopisteen ollessa noin 5,7 metrin etäisyydellä paikoituslaitteesta. Itse paikoituslaitteeseen kohdistuva suurin vääntö kohdistui painopisteen ollessa noin 3,8 metrin etäisyydellä laitteesta. Tulosten perusteella voitiin myös todeta, että kokonaispainosta riippumatta paikoituslaitteeseen kohdistuva maksimivääntömomentti oli rungon kokemaan maksimivääntömomenttiin nähden aina noin 10,5 % suurempi.

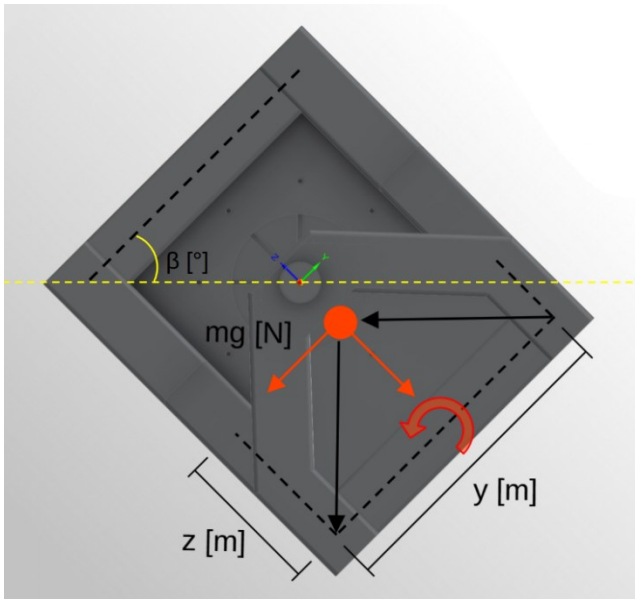
5.1.2 Kääntökulman vaikutus runkoon

Toinen merkittävä vaikuttaja kiinnitinjärjestelmän runkoon kohdistuviin kuormituksiin on paikoituslaitteella tehtävä kääntöliike. Liikkeestä muodostuvia kuormituksia tulee tarkastella monipuolisesti, sillä kääntöliikkeen kulma vaikuttaa huomattavasti niiden suuruuteen sekä suuntaan. Tilannetta lähestyttiin samaan tapaan aikaisemman laskentatyökalun tavoin luomalla tilanteesta ensin vapaakappalekuviot. Kuvioiden avulla havainnollistettiin eri tilanteita ja helpotettiin laskentatyökalun luomista Exceliin.

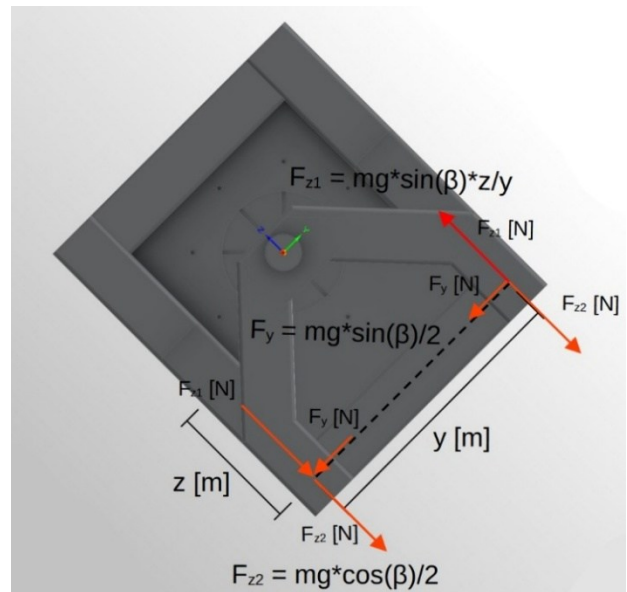
On tärkeää huomata, että ensimmäiseen laskentatyökaluun verrattuna kääntöliikkeen tapahtumaa tulee tarkastella kuitenkin hyvin eri tavalla. Kääntöliikkeessä muodostuvia kuormituksia ei voida tarkastella yksittäisen kokonaispainopisteen avulla. Laskelmat tulee jakaa rungossa muodostuviin kuormituksiin, sekä paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustaviin voimiin. Tämä voidaan tehdä siten, että rungon ja työkappaleen muodostamien painopisteiden vaikutukset eritellään. Painopisteiden ja niistä syntyvien kuormitusten erottelulla mahdollistetaan laskenta siten, että voidaan erikseen huomioida runkoon kohdistuvia voimia mutta myös tarkastella samalla paikoituslaitteeseen kohdistuvia kokonaisvoimia.

Runkoon muodostuvat voimat riippuvat siihen kiinnitettyjen työkappaleiden massasta sekä painopisteen sijainnista z-akselilla rungon alaprofiiliin nähden. Runkoon vaikuttaa myös sen oma paino, joka huomioidaan FEM-laskennassa. Näin voidaan yksinkertaistaa laskentatyökaluja huomioimalla vain työkappaleen muodostamat kuormitukset runkoon. Runkoon kohdistuviin kuormituksiin vaikuttaa myös rungon leveys sekä painopisteen sijainti y-akselilla, mutta tämä jätettiin huomioimatta laskujen yksinkertaistamiseksi. Lähtökohtaisesti työkappaleet tulisi aina asentaa kiinnitinjärjestelmään siten, että niiden painopisteet olisivat keskellä runkoa.

Ensimmäisenä piirrettiin vapaakappalekuviot työkappaleen massan muodostamista voimista sekä vääntömomentista, ja niillä havainnollistettiin rungossa tapahtuvia voimien muutoksia kääntöliikkeen aikana. Kuviossa 9 painovoima on jaettu jo kahteen komponenttiin runkoon nähden suoraviivaisesti. Kääntökulma on merkitty symbolilla β [°], joka saa arvonsa rungon vaakaprofiilin sekä todellisen vaakatason muodostamasta kulmasta. Rungon alaprofiiliin muodostama vääntö on osoitettu punaisella kaarevalla nuolella samaan tapaan, kuin muissakin kuvissa. Kuviossa 10 painovoiman muodostama vääntömomentti on osoitettu komponentteina F_{z1} [N], F_{z2} [N] ja F_y [N].



Kuvio 9. 45 asteen tilanteensa työkappaleen muodostama vääntö rungossa.



Kuvio 10. 45 asteen tilanteesta muodostuvan väännön jako voimien komponentteihin.

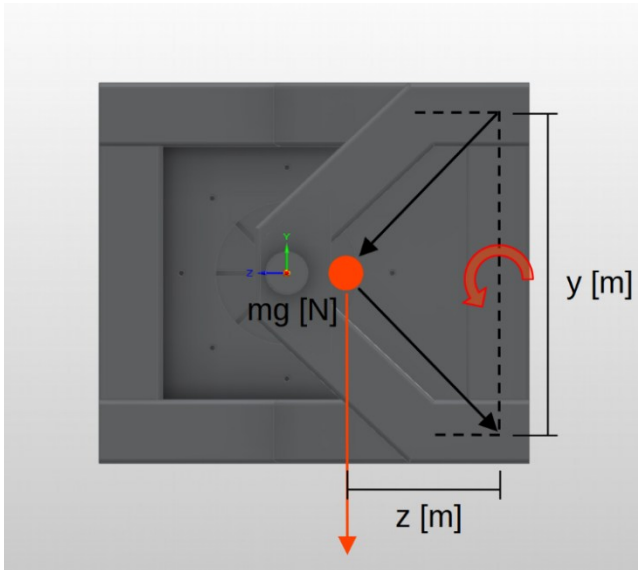
Koska voimat eivät ole todelliseen vaakatasoon nähden suoraviivaisia, tulee näiden laskemiseksi hyödyntää trigonometriaa. Trigonometrian avulla saadaan muodostettua laskukaavat, joiden avulla voidaan selvittää komponenttien tarkat arvot kulman vaihtuessa. Kaavoja varten Exceliin syötettiin tarvittavia muuttujia, kuten painopisteen etäisyys rungon alaprofiilista z [m], työkappaleen massan muodostama painovoima F_{mg} [N] ja rungon alaprofiilien etäisyys toisistaan y [m]. Laskenta suoritettiin samalla periaatteella ensimmäiseen laskentatyökaluun nähden lisäämällä tarvittavat kaavat soluihin ja muodostamalla näiden avulla taulukot. Taulukossa 1 on esitetty laskettuja arvoja analysointia varten.

Voimat ja vääntö β° kulmassa painopisteen ollessa Z				
β [°]	F_{z1} [kN]	F_{z2} [kN]	F_y [kN]	M_r [kNm]
0	0,00	49,05	0,00	0,00
2,5	2,57	49,00	2,14	3,85
5	5,13	48,86	4,27	7,69
7,5	7,68	48,63	6,40	11,52
10	10,22	48,30	8,52	15,33
12,5	12,74	47,89	10,62	19,11
15	15,23	47,38	12,70	22,85
17,5	17,70	46,78	14,75	26,55
20	20,13	46,09	16,78	30,20
22,5	22,52	45,32	18,77	33,79
25	24,88	44,45	20,73	37,31
27,5	27,18	43,51	22,65	40,77
30	29,43	42,48	24,53	44,15
32,5	31,63	41,37	26,35	47,44

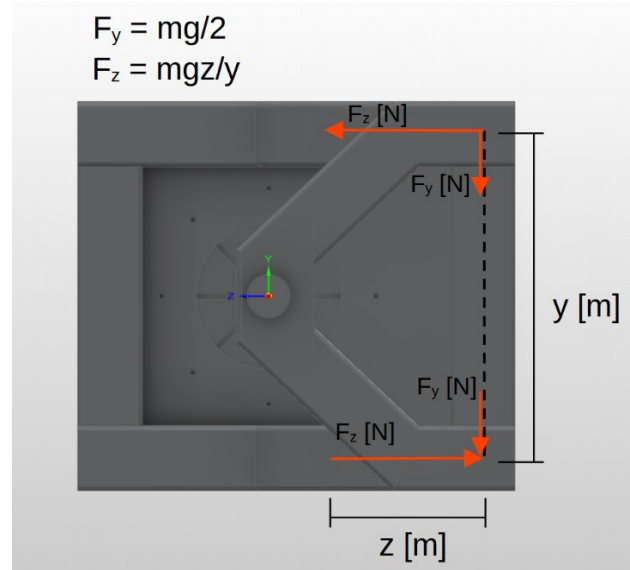
Taulukko 1. Laskentatyökalun taulukko, jossa on esitetty käänkökulman muodostamat voimien komponentit.

Käänköliikkeen aikana muuttuvista voimien komponenteista haluttiin kattava kokonaiskuva, jonka takia komponenttien arvot laskettiin jokaisella β :n arvolla alkaen 0 asteesta aina 90 asteeseen saakka 2,5 asteen porrastuksella. Laskelmien tuloksien muutos automatisoitiin jälleen taulukon avulla, jolloin z-mittaa sekä työkappaleen painoa muuttamalla saadaan jokaisen voiman komponentin arvo jokaisessa käänköliikkeen kulmassa valituilla muuttujilla. Tällä tavoin voimia voidaan nopeasti tarkastella useassa eri asennossa muuttamalla vain kahta muuttujaa.

On selvää, että 90 asteen kulmassa työkappaleesta runkoon kohdistuva vääntömomentti on suurimmillaan, koska painopisteen vipuvarsi on tällöin pisin. Tilannetta on havainnollistettu vapaakappalekuviolla 11 ja 12, joissa esitetään runkoon kohdistuva vääntö sekä voimien komponentit F_z [N] ja F_y [N]. Tilanteen kuormitusten tarkastelua varten luotiin oma taulukko, jossa osoitetaan komponentista F_z syntyvä voima sekä vääntömomentti. Taulukkoon laskettiin tulokset jokaisella painopisteen etäisyydellä z [m] 0 metristä valittuun metrimäärään saakka 0,05 metrin porrastuksella. Komponenttia F_y ei ilmoitettu taulukkoon erikseen, sillä sen arvo ei muutu z-mitan vaikutuksesta rungon ollessa 90 asteen asennossa. Komponentin F_y arvoon vaikuttaa ainoastaan työkappaleen massa, jota voidaan säätää samalla tavalla z-mitan tapaan askelpainikkeita painamalla.



Kuvio 11. 90 asteen tilanteesta työkappaleen muodostama vääntö rungossa.



Kuvio 12. 90 asteen tilanteesta muodostuvan väännön jako voimien komponentteihin.

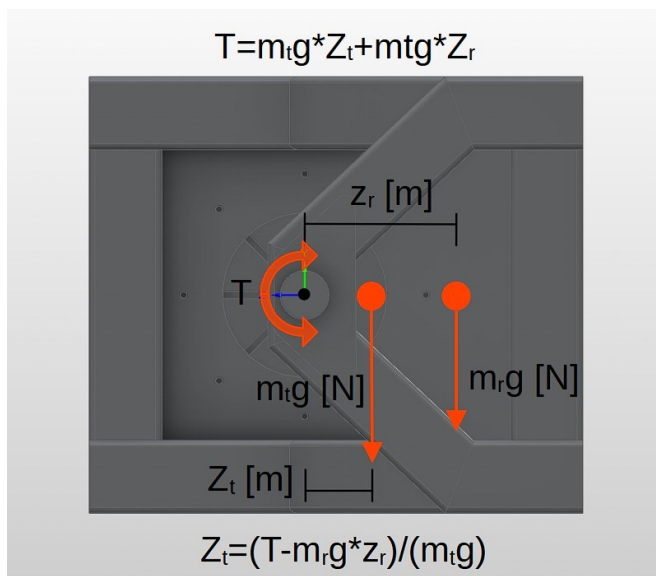
Runkoon kohdistuvia voimia voidaan laskea nopeasti ja monipuolisesti laskentatyökalujen avulla. Niiden avulla ei voida kuitenkaan yksinään määrittellä massojen tai painopisteiden etäisyyksien raja-arvoja pyörähdysakseliin nähden. Tämä johtuu siitä, että runkoa voidaan käytännössä aina vahvistaa massojen suurentuessa. Varsinainen rajoittava tekijä kiinnitinjärjestelmän suunnittelussa on sitä kääntävän paikoituslaitteen kääntöliikkeen momentti 25 000 Nm. Momentti luo muuttumattoman rajoitteen koko kiinnitinjärjestelmän sekä siihen asennettavien työkappaleiden massojen ja painopisteiden etäisyyksien suhteen.

Paikoituslaitteeseen kohdistuvia kääntöliikettä vastustavia vääntömomenteja tulee tarkastella kokonaisuutena, johon työkappaleen painon ja painopisteen lisäksi on huomioitu rungon oma paino ja painopiste. Tulee huomata, että työkappaleen painopisteen siirtyessä z-akselin nollakohtaan toiselle puolelle sen luoma vaikutus paikoituslaitteeseen muuttuu toisen suuntaiseksi. Tästä syystä laskelmien tulokset tulee jakaa kahteen osaan, joissa painopisteet ovat sekä samalla että eri puolella akselia.

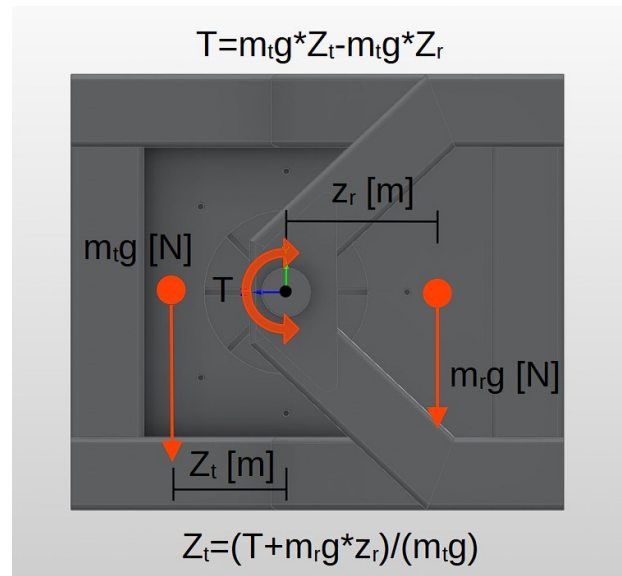
Koska käytettävissä on maksimissaan 25 000 Nm, voidaan momenttitasapainon avulla määrittellä raakoja raja-arvoja massoille sekä painopisteiden etäisyydelle pyörähdysakselista. Raakoihin raja-arvoihin ei voida kuitenkaan suoraan verrata esimerkiksi uutta työkappaleita kiinnitinjärjestelmään asennettaessa. Tämä johtuu siitä, ettei paikoituslaitetta tule ajaa teoreettisella maksimiväännöllä, sillä jo pienikin muutos painopisteen etäisyydessä

esimerkiksi rungon joustessa saisi maksimimomentin ylityksen aikaan. Raja-arvoja voidaan hyödyntää rungon suunnittelussa, mutta todellisuudessa näihin tulee yhdistää sopiva varmuuskerroin, jolla varmistetaan aina riittävä välimatka maksimivääntöön nähden.

Kuvioissa 13 sekä 14 on esitetty miten painopisteet muodostavat paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavaa vääntömomenttia. Tilannetta tarkastellaan rungon ollessa 90 asteen kulmassa, koska kuten runkoon kohdistuvan momentin tilanteessa, myös paikoituslaitteeseen kohdistuva maksimimomentti tapahtuu 90 asteen kulmassa. Tilanteessa vaikuttavia tekijöitä ovat massojen m_t [kg] ja m_r [kg] paino sekä niiden muodostamien painopisteiden etäisyydet pyörähdysakselista z_t [m] sekä z_r [m]. Momenttitasapainon kaavaa muuntamalla voidaan laskea etäisyyksien arvot, joiden avulla voidaan määrittää, kuinka painavia työkappaleita kiinnitinjärjestelmään voidaan asentaa painopisteen ollessa z_t . Laskenta edellyttää, että kiinnitinjärjestelmän muodostama paino sekä painopisteen sijainti tunnetaan työkappaleen tietojen lisäksi. Tarvittavat tiedot voidaan helposti tarkistaa Solid Edgen Data Management-välilehdeltä.



Kuvio 13. Paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavat voimat painopisteiden ollessa samalla puolella pyörähdysakselia.

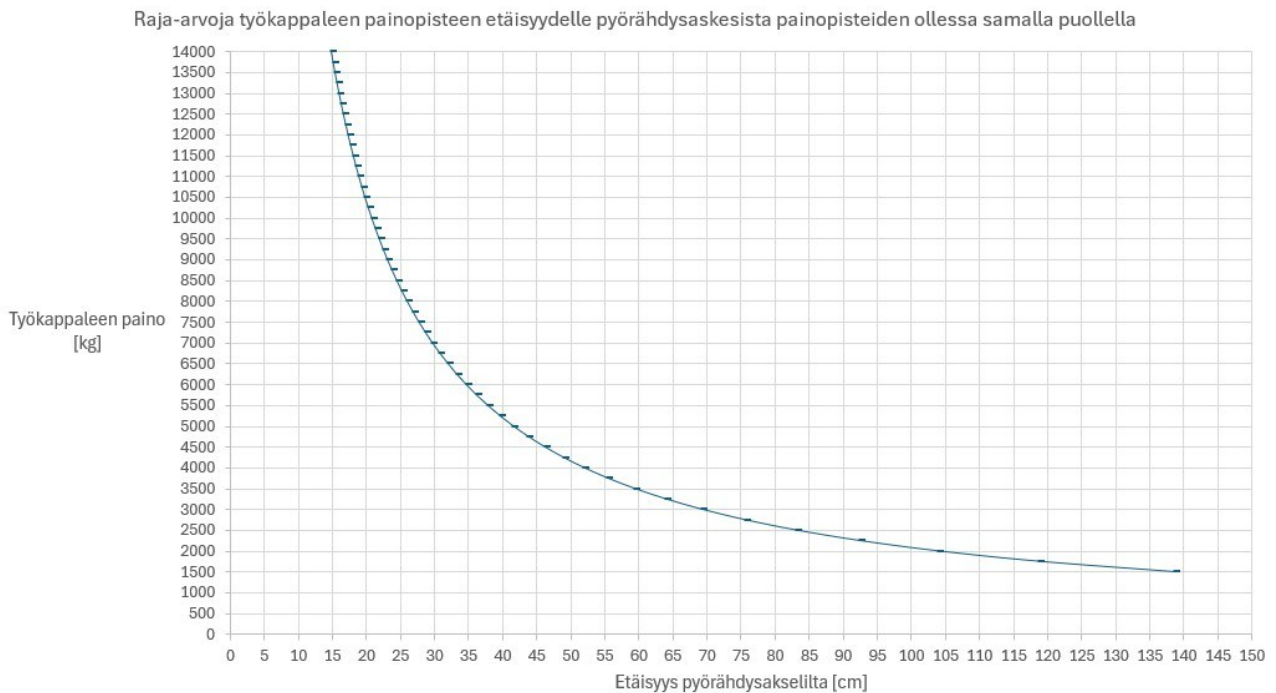


Kuvio 14. Paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavat voimat painopisteiden ollessa eri puolella pyörähdysakselia.

Laskentakaavat lisätiin Excel-taulukkoon, ja niiden avulla luotiin jälleen tilannekohtainen laskentataulukko. Taulukon ansiosta nähdään suoraan se, mille etäisyydelle työkappaleiden painopisteiden tulee rajautua, jotta paikoituslaitteen maksimimomenttia ei ylitetä. Taulukoita luotiin kaksi ja ne antavat arvoja molemmista kuvioissa 13 ja 14 tilanteista, joissa

työkappaleen painopiste on joko kiinnitinjärjestelmän muodostaman painopisteen kanssa samalla tai eri puolella pyörähdysakselia. Taulukon avulla voidaan myös säätää kiinnitinjärjestelmän muodostamaa painopistettä joko vastapainon avulla tai rungon syvyyttä muuttamalla. Näiden avulla voidaan vaikuttaa kiinnitinjärjestelmään kiinnitettävien työkappaleiden valikoimaan.

Laskentataulukoiden tulosten avulla raja-arvoista luotiin myös taulukon mukaan päivittyvät kuvaajat, joiden avulla voidaan havainnollistaa painopisteiden etäisyyksien sekä massojen suhdetta. Kuviossa 15 esitetään yksi Excel-pohjassa luotu kuvaaja. Tulee huomata, ettei arvot ja niistä muodostuva kuvaaja ole kuitenkaan lopullisia alustavan mitoituksen takia. Kun taulukon tuloksiin lisätään sopiva varmuuskerroin ja tiedetään lopullinen mitoitus kiinnitinjärjestelmän rungolle, voidaan kuvaajista tuottaa kuvat yritykselle. Kuvien avulla nähdään suoraan, millaisia työkappaleita kiinnitinjärjestelmässä voidaan käyttää. Tämä tieteenkin edellyttää, että kiinnitinjärjestelmä kestää siihen työkappaleista muodostuvat voimat, joka varmistetaan aikaisempien laskentatyökalujen sekä elementtimenetelmän avulla.



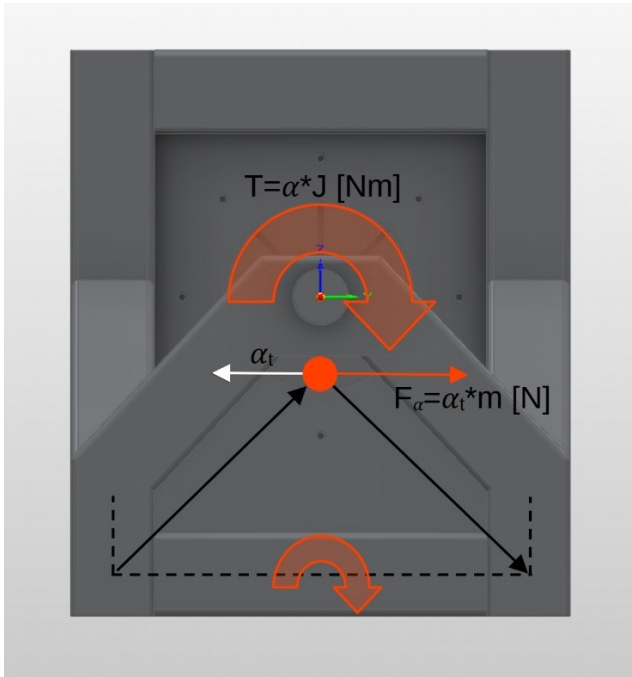
Kuvio 15. Paikotuslaitteen raakoja raja-arvoja kokonaispainon ja sen maksimietäisyydelle pyörähdysakselista painopisteiden ollessa samalla puolella pyörähdysakselia.

5.1.3 Muut lujuuslaskentaan vaikuttavat tekijät

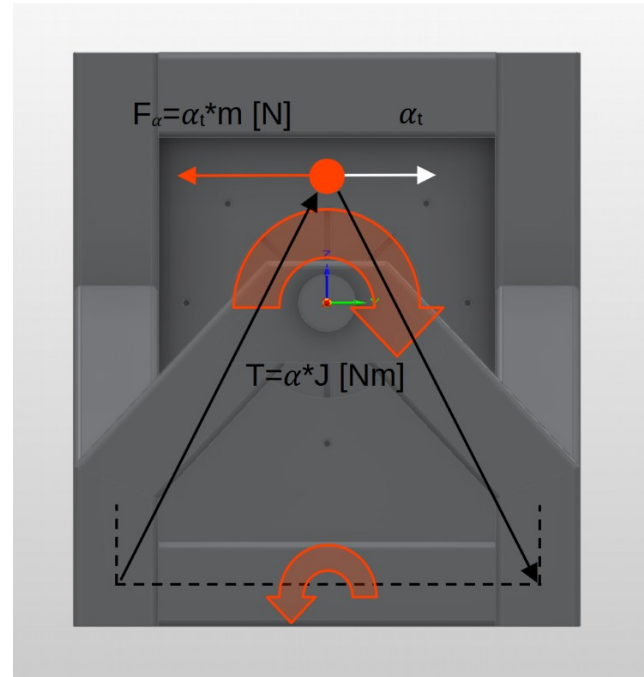
Lujuuslaskentaan vaikuttaa muitakin asioita aikaisempien tilanteiden lisäksi. Näitä ovat esimerkiksi hitsauksessa muodostuva lämpötilavaihtelu ja paikoituslaitteen kääntöliikkeen kiihtyvyys. Hitsauksen aiheuttamaa lämpötilaa ei huomioitu laskennoissa. Työkappaletta hitsatessa lämpöä siirtyy kiinnitinjärjestelmän runkoon, mutta sen vaikutus ei ole merkittävä vaihtelevan hitsausjärjestyksen takia. Kiinnitinjärjestelmän rungossa muodostuvat voimat jäävät niin hyvin materiaalin myötörajan alapuolelle, että hitsauksesta siirtyvä lämpö kiinnitinjärjestelmään ei luo merkittävää eroa rungon kestävyden kannalta. Tämän lisäksi runko pääsee vapaasti laajentumaan kannatinyksikön päästä, jolloin rungon laajentumisesta muodostuvat voimat eivät rasita esimerkiksi paikoituslaitteen kiinnitystä normaalia enempää.

Paikoituslaitteen kiihtyvyydellä on kuitenkin huomattava vaikutus kiinnitinjärjestelmän runkoon muodostuviin voimiin. Sen lisäksi kiihtyvyys vaikuttaa myös paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavien vääntömomenttien suuruuteen. Robottisolun valmistaja ei ollut kuitenkaan ilmoittanut tietoja kääntöliikkeen kiihtyvyyteen liittyen. Asiasta tehtiin valmistajalle selvityspyyntö, mutta tietoja ei kuitenkaan työn aikana saatu. Tiedonpuutteesta huolimatta kiihtyvyyden vaikutuksesta luotiin omat vapaakappalekuviot sekä alustavat laskentatyökallut Excel-pohjaan.

Kuvioissa 16 ja 17 esitetään työkappaleen painopisteessä muodostuva tangentiaalikihtyvyys α_t [m/s^2] ja siitä syntyvä voima F_α [N] sekä paikoituslaitteen kulmakihtyvyys α [rad/s^2]. On tärkeää huomata, että runkoon kohdistuva vääntömomentti vaihtaa suuntaa riippuen painopisteen sijainnista pyörähdysakseliin nähden. Vapaakappalekuvioista voidaan päätellä, että kiihdytyksestä runkoon kohdistuva vääntö joko suurentaa tai tasapainottaa runkoon kohdistuvaa kokonaisvääntöä. Rungon kuormitusrajaa laskiessa voidaan keskittyä vain tilanteeseen, jossa kiihdytys lisää kokonaiskuormitusten määrää.



Kuvio 16. Kiihtyvyydestä runkoon muodostuva vääntö painopisteen ollessa pyörähdyks- akselin x alapuolella.



Kuvio 17. Kiihtyvyydestä runkoon muodostuva vääntö painopisteen ollessa pyöräh- dysakselin x yläpuolella.

Kääntöliikkeen kiihdytyksestä muodostuvia voimia tarkasteltiin samalla laskentataulukko- menetelmällä, kuin muissakin tilanteissa. Runkoon kohdistuva vääntömomentti muutettiin voimien komponentteihin, joiden arvot laskettiin taulukkoon. Kiihdytyksessä syntynyt vääntö tapahtuu kääntökulman määrästä riippumatta. Taulukon avulla lasketut arvot voi- daan suoraan yhdistää esimerkiksi 45 asteen tai 90 asteen kulmasta aiheutuviin staattisiin kuormituksiin. Tällöin voidaan määrittää lopulliset runkoon kohdistuvat kokonaiskuormituk- set, joiden avulla voidaan tarkastella rungon käyttäytymistä tarkasti elementtimenetelmää hyödyntäen. Kiihtyvyyden saa aikaan myös paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavia voimia riippuen työkappaleen sekä kiinnitinjärjestelmän omasta massasta ja painopisteen etäisyy- destä pörähdyksakseliin nähden. Tilanteen laskemista voidaan helpottaa tarkastelemalla työkappaleen sekä kiinnitinjärjestelmän muodostamaa kokonaispainoa ja painopistettä. Lopullisia arvoja kuitenkin ei voitu tiedonpuutteen takia laskea, joten näiden todellinen vaikutus jäi arvioiden varaan.

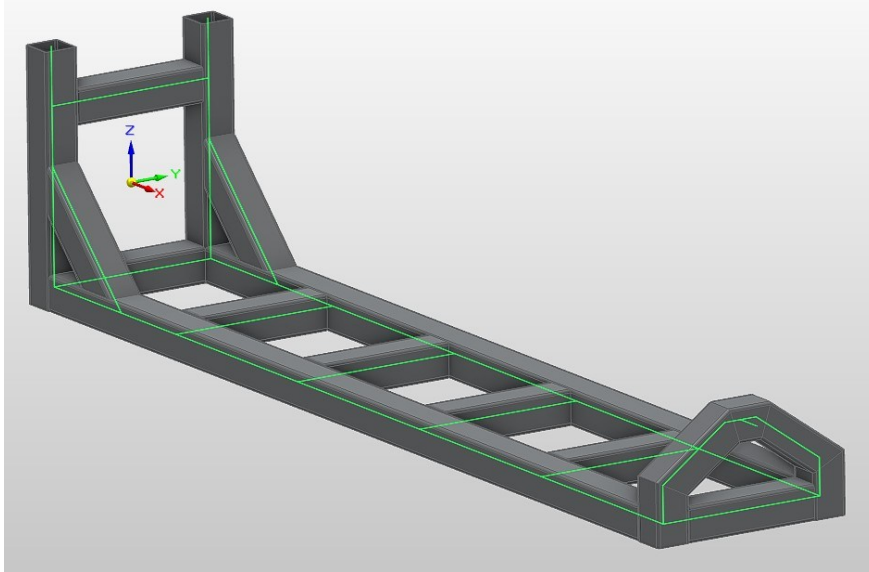
5.2 Lujuuslaskenta elementtimenetelmää hyödyntäen

Kiinnitinjärjestelmän runkorakenteessa jakautuvien rasitusten laskemiseksi työssä hyödynnettiin FEM-laskentaa. FEM-laskentaprosessi tarjoaa manuaaliseen laskentaan verrattuna nopean menetelmän laskea runkoon muodostuvia rasituksia. Kun runko rakennetaan virtuaaliseen ympäristöön, voidaan sen geometriaa, kokoa ja kuormituksia vaihdella nopeasti ja optimoida rungon rakennetta kustannustehokkaasti. Menetelmä edellyttää kuitenkin, että laskenta on toteutettu tarkasti, jonka takia laskennassa käytetyt voimat, sekä tukireaktiot on oltava verrattavissa todelliseen tilanteeseen. Vain tarkasti tehdyn laskennan tuloksia voidaan hyödyntää mekaniikkasuunnittelussa.

FEM-laskenta tarjoaa mahdollisuuden visualisoida rungon taipumista ja korostaa liikkeitä prosentuaalisesti. Tällöin rungon käyttäytymistä kovassa kuormituksessa on helpompi sisäistää ja sitä kautta löytää rakenteesta heikot paikat. FEM-laskennan avulla nähdään myös rungossa syntyvät suurimmat kuormituspisteet, joita voidaan lievittää rakennetta kehittämällä, jos kuormitukset ylittävät halutun varmuuskertoimen. Kuormitusten ollessa mallitilliset kyseisissä pisteissä voidaan laskennasta kerättyä tietoa hyödyntää kiinnitinjärjestelmän käyttöohjeistuksessa luomalla kuormituspisteitä koskevat seurantaohjeet.

5.2.1 Kiinnitinjärjestelmän rakenteen luominen virtuaaliseen ympäristöön

Kiinnitinjärjestelmän FEM-laskentaa varten CAD-mallinnus suoritettiin Siemensin Solid Edge Student edition 2024-mallinnusohjelmalla. Järjestelmän mallinnus aloitettiin ohjelman Frame-ympäristössä, jonka avulla luotiin varsinainen runkorakenne laskentoja varten. Frame-ympäristö mahdollistaa runkorakenteen nopean toteutuksen piirtämällä pelkät mittasuhteet runkoa varten ja liittämällä niihin haluttu runkoprofiili. Tällöin ohjelma mallintaa rungon profiilit mittasuhteisiin nähden automaattisesti, eikä käyttäjällä tarvitse muokata kuin profiilien liitoskohdat sopivaksi. Kuviossa 18 on esitetty runkoprofiilien luominen Frame-ympäristössä.



Kuvio 18. Kiinnitinjärjestelmän runkoprofiilien mallinnus Solid Edge Student Edition 2024 Frame-ympäristössä.

Haluttua runkoprofiilia varten tulee piirtää profiilin poikkileikkauksen mittasuhteet ja tallentamalla tämä SolidEdgen Frames-tiedostokansioon. Profiilin muuttamiseksi voidaan muokata joko suoraan piirrettyä poikkileikkausta tai luomalla useampi poikkileikkaus eri mittasuhteilla runkoprofiilin muuttamisen nopeuttamiseksi. Itse rungon mittasuhteita voidaan muokata vapaasti, jolloin ohjelma automaattisesti joko vähentää tai lisää profiilien pituudesta mittasuhteiden mukaisesti. Fame-ympäristössä ei ole kuitenkaan suositeltavaa suorittaa FEM-laskentaa, sillä se ei mahdollista muiden kappaleiden lisäämistä laskentaprosessiin, joka on välttämätöntä tarkan FEM-laskennan suorittamiseksi. Muut kiinnitinjärjestelmään kuuluvat komponentit mallinnettiin SolidEdgen perinteisessä isometrisessä part-ympäristössä

Rungon sekä muiden komponenttien mallintamisen jälkeen luotiin yhtenäinen malli kiinnitinjärjestelmästä Assembly-ympäristössä. Ympäristöön voi kuitenkin liittää vain part-tiedostoja, joka edellytti runkoprofiilien muuntamista yksittäisiksi part-tiedostoiksi. Tämä voidaan toteuttaa tavalla, joka linkittää Frame-ympäristössä mitoitettujen profiilien sijainnin sekä mittasuhteet part-tiedostoon. Tällöin Frame-ympäristössä tehdyt mittasuhteiden muutoksen välittyvä suoraan Assembly-ympäristöön runkoa muuttaessa. Mittasuhteiden linkittäminen nopeuttaa kiinnitinjärjestelmän runkorakenteen kehitystä huomattavasti, mutta mallinnuksessa törmättiin ongelmaan, jossa Assembly-ympäristö kaatui toistuvasti mittasuhteita muuttaessa muiden kiinnitinjärjestelmän komponenttien ollessa läsnä. Ongelman

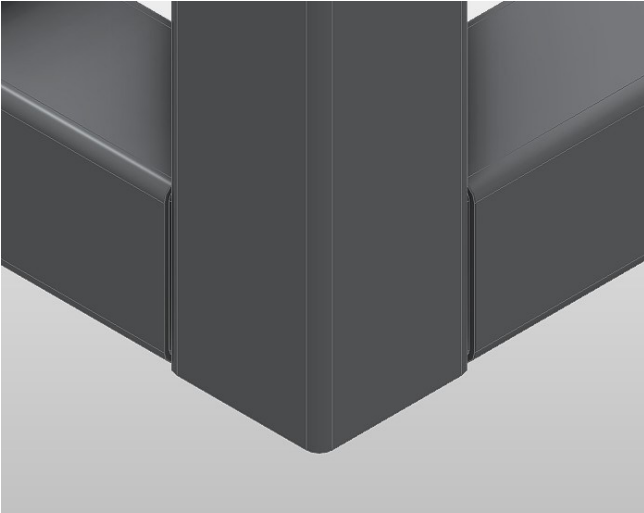
juurisyytä ei saatu korjattua, sillä ohjelma kaatui välittömästi kirjottamatta havaittua ongelmaa lokitiedostoon. Ongelma väistettiin kuitenkin Siemensin tukipalvelun kautta saadun lisäohjelma avulla, jolla runkoprofiilien muuntaminen part-tiedostoiksi saatiin automatisoitua. Tällöin mittasuhteiden linkitystä ei ollut tarpeen käyttää, sillä niiden muuttaminen korvattiin itse profiilien part-tiedostoja korvaamalla mittasuhteiden muuttuessa.

5.2.2 FEM-laskennan optimointi

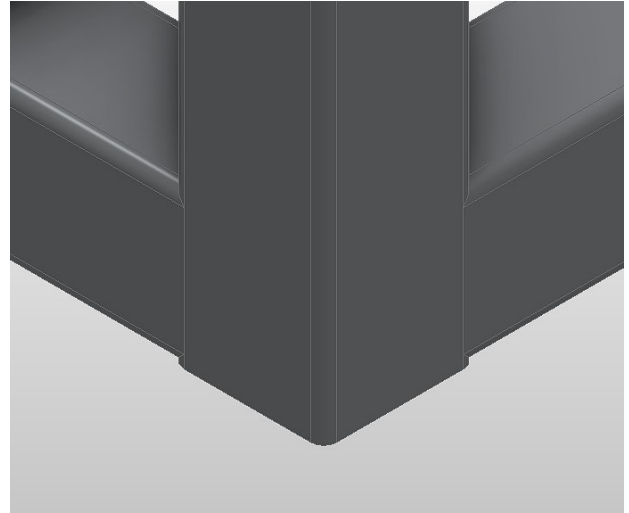
Kiinnitinjärjestelmän rakentaminen Assembly-ympäristössä on välttämätöntä esimerkiksi tuotekohtaisten kiinnittimien sekä kohdistimien suunnittelua varten. Kun kokonaisuus rakennetaan Assembly-ympäristöön, voidaan kerätä kriittisiä tietoja esimerkiksi Excelissä rakennetun laskentapohjan kannalta. Tämä tapahtuu siten, että osille määrätään todellisuutta vastaavat materiaaliominaisuudet, jolloin ohjelmalla voidaan suoraan määritellä kiinnitinjärjestelmästä muodostuva paino sekä painopisteen sijainti origoon nähden. Koska kiinnitinjärjestelmä kasattiin origoon nähden oikealla tavalla x-akselin kuvatessa paikoituslaitteen pyörähdysakselia, nähdään tiedoista suoraan painopisteen etäisyys pyörähdysakselista.

FEM-laskennan kannalta rakenteiden tulee olla riittävän yksityiskohtaisia, mutta ne eivät saa olla silti liian monimutkaisia. Kaikkiin komponentteihin muodostuvat rasitukset voidaan laskea elementtimenetelmällä, mutta ennen laskennan aloittamista tulee määritellä ensin, mitä on oikeasti tarpeen sisällyttää laskelmiin. Tämä johtuu siitä, että komponenteista muodostuvien elementtiverkkojen määrä sekä monipuolisuus kasvattaa laskentaan tarvittavaan prosessointikapasiteettiä ja aikaa huomattavasti. Jotta FEM-laskenta olisi tehokasta kiinnitinjärjestelmän rakenteen kehittämisen kannalta tulee tietyt asiat optimoida laskentaa varten.

Kiinnitinjärjestelmän kiinnittimien laskenta päätettiin toteuttaa täysin erillisenä muuhun kiinnitinjärjestelmään nähden, sillä kiinnittimiin kohdistuvat rasitukset ovat todella tuotekohtaisia ja monipuolisia. Näiden sisällyttäminen rungon FEM-laskentaan hidastaisi laskentaprosessia merkittävästi. Itse rungon laskenta suoritettiin muuten yhtenäisesti niin, että siihen sisällytettiin esimerkiksi paikoituslaitteen päätyyn hitsattava kiinnityslaippa ja kannatinyksikön päähän hitsattava teräsputki.

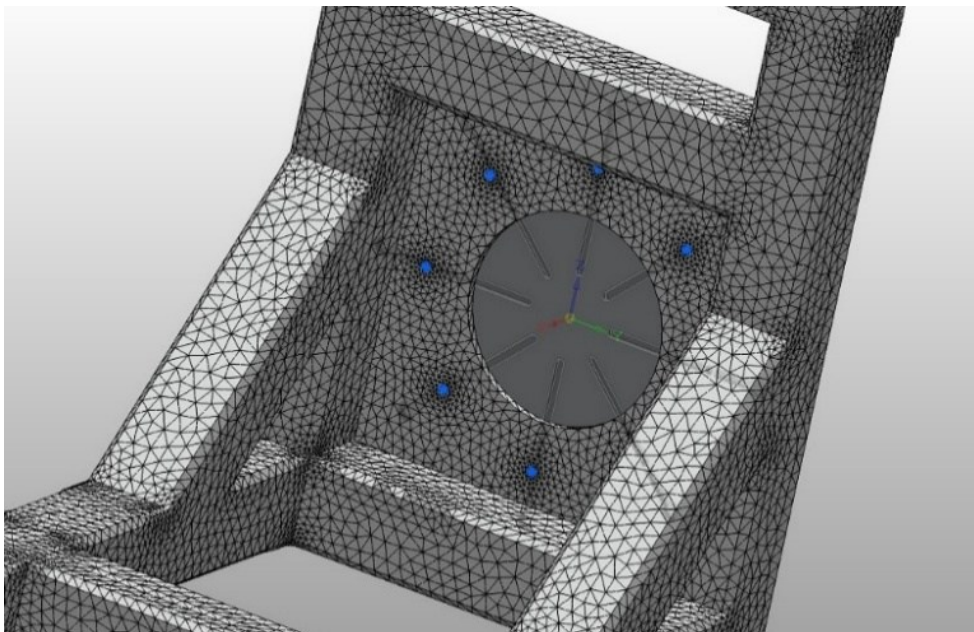


Kuvio 19. Runkoprofiilien liitos ilman optimointia.



Kuvio 20. Runkoprofiilien liitos optimoitu FEM-laskentaa varten.

Rungon laskentaa optimoitiin myös muodostamalla yksittäisistä profileista yhtenäinen part-tiedosto, jolloin välttyttiin jokaisen liitoskohdan erilliseltä laskemiselta. Tämä toteutettiin siten, että Assembly-ympäristössä mallinnettiin liitoskohtien hitsausseamit lisäämällä materiaalia profiilien liitoskohtiin. Tällöin profiilien liitoskohtiin ei jäänyt tyhjiä välejä, jotka tulisi erikseen huomioida laskentaprosessin aikana. Kuvioissa 19 ja 20 esitetään, miten profiilien liitoskohta optimoitiin FEM-laskentaa varten. Hitsausliitosten mallinnuksen tarkkuus tarkastettiin erillisellä laskennalla, joilla varmistettiin oikeaoppinen voimien siirtyminen liitoskohdissa.



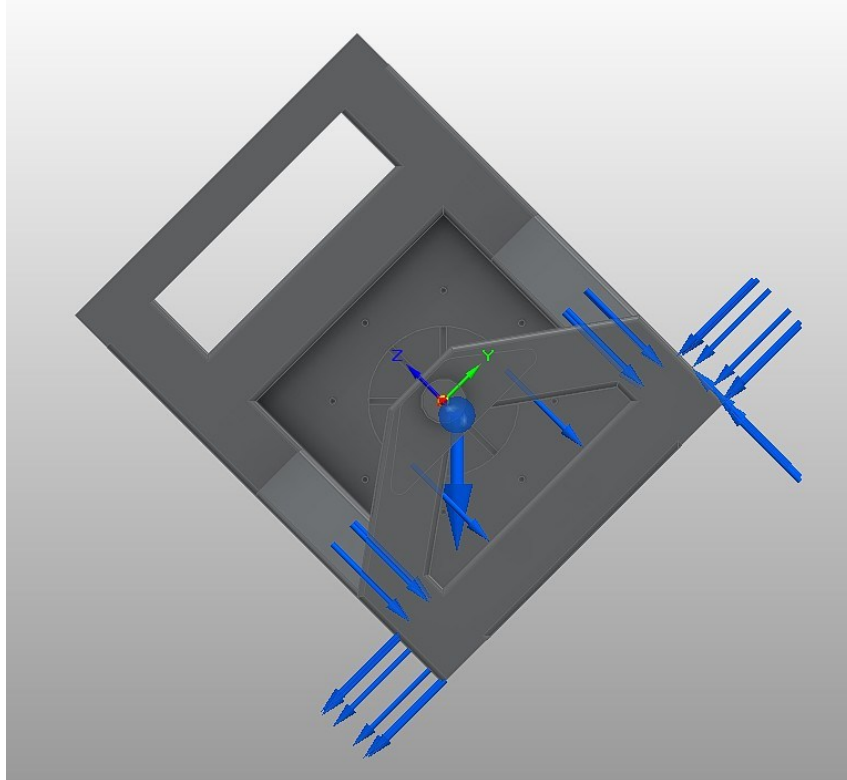
Kuvio 21. FEM-laskentaa varten luotu elementtiverkko kiinnitinjärjestelmän kokoonpanosta.

Yhtenäinen rakenne nopeuttaa laskennan suorittamista huomattavasti, jolloin aikaa jää enemmän eri tilanteiden laskemista ja rakenteen kehittämistä varten. Kuviosta 21 huomataan, että optimoitu rakenne muodostaa yhtenäisen elementtiverkon, joka vähentää elementtiverkossa muodostuvien virheiden määrää sekä terävien reunojen luomia epätarkkuuksia. Kiinnitinjärjestelmään kiinnitettäviä tuotteita ei myöskään tuotu laskelmiin mukaan useasta eri syystä. Merkittävin syy tähän oli se, että laskentaprosessi hidastuisi huomattavasti sekä tulokset olisivat tällöin tuotekohtaisia. Tuotteen lisääminen simulointiin ottaisi huomioon voimien jakautumisen tuotteen oman rakenteen lävitse. Tämä tieto ei ole kuitenkaan tarpeen, koska runko suunnitellaan lähtökohtaisesti siten, että tuotteen geometriasta huolimatta tietyt suuruiset massat voidaan asentaa tietylle etäisyydelle painopisteestä.

5.2.3 FEM-laskennan valmistelu

FEM-laskenta suoritettiin Solid Edgeen sisällytettyä FEM-laskentatyökalua hyödyntäen, jonka toiminta perustuu Simcenter Femap ja Nastran teknologioihin (Siemens, 2020, s. 1–4). Hyödyntämällä CAD-ohjelmaan sisällytettyjä FEM-laskentatyökaluja, nopeutuu laskentaprosessi huomattavasti. Mallia ei tarvitse erikseen siirtää eri ohjelmaan, vaan laskenta onnistuu hyödyntämällä aikaisemmin luotua CAD-kokoonpanoa. Tämän lisäksi CAD-kokoonpanoon tehdyt muutokset voidaan muuttaa nopeasti laskentaa varten päivittämällä luotua elementtiverkkoa.

FEM-laskentaa varten luotiin laskentatilanteet, jotka määriteltiin aikaisemmassa osiossa ääritilanteiden arvioinnin avulla. Tilanteet muodostuvat kahdesta päätilanteesta, joista molemmista on kolme eri laskentaa. Päätilanteet määräytyvät työkappaleen painopisteen siirtymän x-akselilla pituussuuntaisesti aiheuttavan maksimikuormitusten perusteella. Kuten laskentatyökalun tuloksista huomattiin, runkoon sekä paikoituslaitteen kiinnitykseen muodostuu suurin vääntömomentti työkappaleen ollessa tietyllä etäisyydellä paikoituslaitteen kiinnityspisteestä. Etäisyys, jossa runkoon kohdistui suurin rasitus, oli 5,7 metriä paikoituslaitteesta. Etäisyys, jossa rungon kiinnityskohtaan kohdistui suurin rasitus, oli 3,8 metriä paikoituslaitteesta. Päätilanteista tehtävät kolme laskentaa muodostuvat kääntökulmista, jossa kiinnitinjärjestelmä on 0, 45 ja 90 asteen kulmassa todelliseen vaakatasoon nähden.



Kuvio 22. Voimien komponentit sijoitettuna FEM-laskentaan

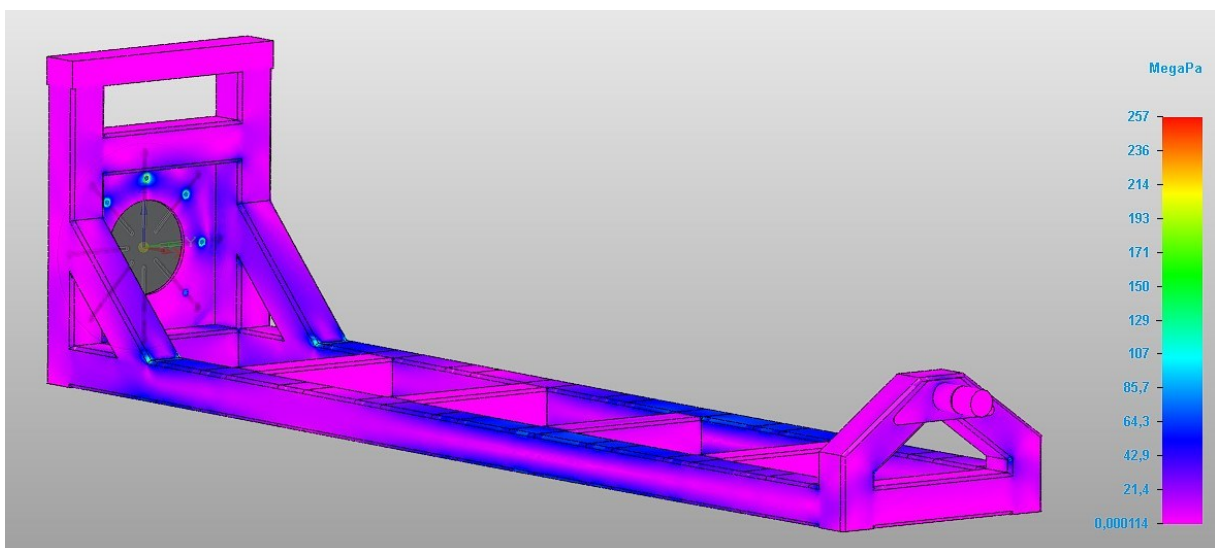
Laskentaa varten muodostui yhteensä 6 eri tilannetta, joita varten tuli määrittää tilannekohtaiset voimien komponentit ja oikeaoppiset tukireaktiot sekä komponenttiliitokset. Voimien komponenttien määrittämiseksi hyödynnettiin aikaisemmin luotuja laskentatyökaluja, joiden avulla komponenttien arvot saadaan nopeasti selville. Komponenttien voimat sijoitettiin laskentaan siten, että ne vastaisivat todellista tilannetta rungon kuormittuessa valitulla massalla. Kuviossa 22 on esitetty komponenttien sijoitus malliin FEM-laskentaa varten

Voimien lisäksi laskentaa varten tuli muodostaa asianmukaiset tukireaktiot sekä komponenttiliitokset. Kannatinyksikön päälle asetettavalle teräsputkelle asetettiin liikuntarajoite, joka tukee putkea alapuolelta sallien silti vapaan taipumisen rungon kanssa. Rajoite muodostaa kannatinyksikön tapaan pallomaisen tukinivelen. Paikoituslaitteen kiinnityksen tukireaktio luotiin muodostamalla ruuviliitos rungon kiinnityslaipasta erikseen mallinnettuun paikoituslaitteen pöytälevyyn. Itse paikoituslaitteen pöytälevy asetettiin kiinteäksi laskentaa varten. Rungon kiinnityslaipan sekä pöytälevyn välille lisättiin vielä ylimääräinen tukireaktio ruuviliitoksen lisäksi, joka simuloi paikoituslaitteen pöytälevyn luomaa tukea rungon kiinnityslaippaa vasten.

5.2.4 FEM-laskennan tuloksia

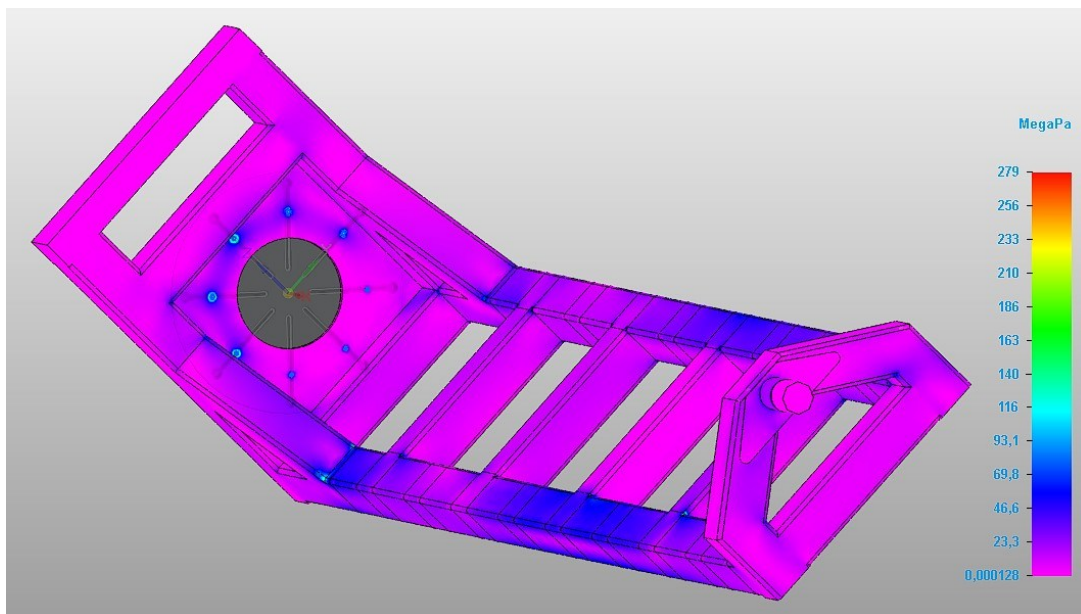
FEM-laskennan tulosten avulla kiinnitinjärjestelmän eri komponentteja kehitettiin työn aikana. Tiedonpuutteitten takia lopullisia laskelmia taikka mitoituksia järjestelmälle ei kuitenkaan saatu tehtyä. Lopullisten FEM-laskentatulosten saamiseksi on välttämätöntä tietää esimerkiksi paikoituslaitteen kiihtyvyyteen vaikuttavat tekijät. Tietoja kiihtyvyydestä tai muista avoimeksi jääneistä tekijöistä ei kuitenkaan työn aikana saatu, jolloin rungon lopullista mitoitusta ei voitu suorittaa. Tästä huolimatta työssä suoritettiin FEM-laskennat alustavalla runkomitoituksella, jota on aikaisemman mallinnustyön ansiosta helppo muuttaa tulevaisuudessa lopulliseksi, kun puutteellisiin tietoihin saadaan varmuus. FEM-laskentoihin ei toistaiseksi sisällytetty kiihtyvyyden muodostamia lisävoimia, sillä todellisia arvoja kiihtyvyydestä muodostuville voimien komponenteille ei saatu laskettua. Nämäkin on tulevaisuudessa helppo lisätä valmiiseen simulaatioon luotujen laskentataulukoiden avulla.

Kuvissa esitetyt laskennat suoritettiin alustavilla kiinnitinjärjestelmän mitoituksilla, jossa työkappaleen massa oli 10 000 kg ja massan painopiste sijaitsi 5,7 m päästä paikoituslaitteesta. Tällöin massa muodostaa suurimman mahdollisen kuormituksen järjestelmän runkoon. Runkoon kohdistuvien voimien komponentit laskettiin massan painopisteen ollessa z-akselin yläpuolella 6 senttimetrin päästä teoreettisesta maksimirajasta. Tällöin voidaan varmistaa, että paikoituslaite jaksaa tehdä kääntöliikkeen. Tämän lisäksi kiinnitinjärjestelmän runkoon kohdistuva vääntö on lähestulkoon suurin, mitä se tulee realistisesti kokemaan.



Kuvio 23. FEM-laskentatulokset 0 asteen tilanteessa.

Kuviosta 23 huomataan, että runkoon muodostuvat voimat ovat verrattain pienet materiaalivahvuuteen nähden. Suurimmat kuormituspisteet ovat havaittavissa kiinnitinjärjestelmän ruuviliitoksessa sekä ristiin kulkevien runkoprofiilien hitsausliitoksessa. Tuloksista on myös huomattavissa kohta, jossa runkoon kohdistuva vääntö vaihtaa suuntaa. Suurin laskennassa havaittu voima on 257 MPa, mutta sen esiintyminen osoittautui huippuarvoksi, joka voidaan jättää huomioimatta. Rakenteeseen kohdistuvia todellisia kuormituksia analysoitiin laskentatulosten väridiagrammilla ja todettiin, että kiinnitinjärjestelmän maksimikuormitukseksi saatiin noin 170 MPa. Tulos on huomattavasti alle S355 rakenneteräksen myötörajan 355 MPa.

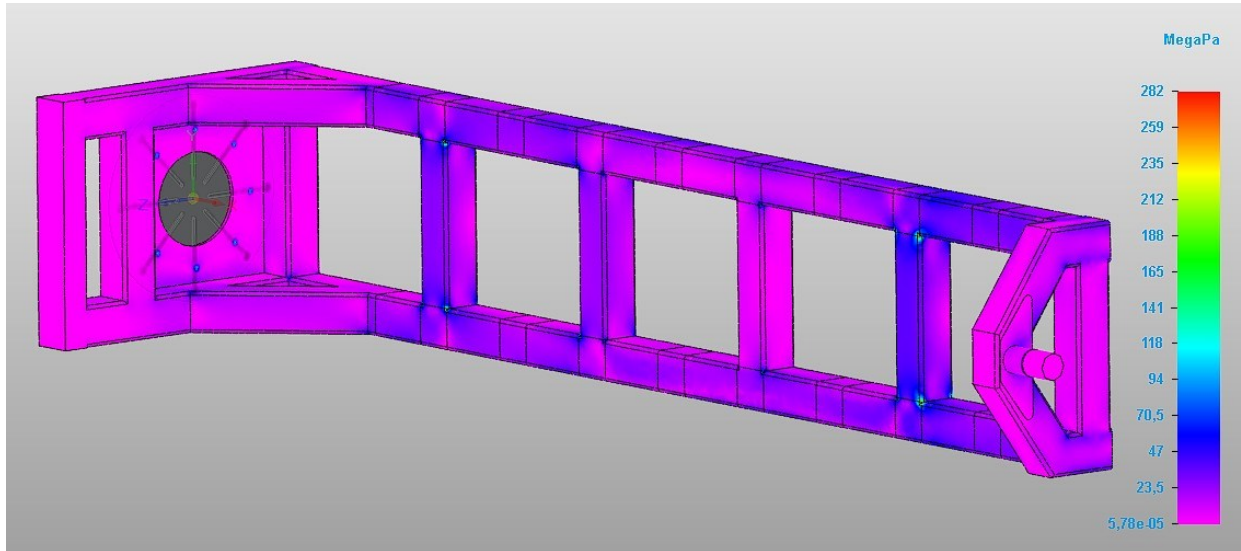


Kuvio 24. FEM-laskentatulokset 45 asteen tilanteessa.

Kuviossa 24 on esitetty vastaavan työkappaleen muodostamat voimat runkoon kiinnitinjärjestelmän ollessa 45 asteen kulmassa. Laskennan tuloksista analysoitiin samalla tavalla aikaisempaan tilanteeseen nähden. Analysoinnin pohjalta huomattiin, että kiintiöjärjestelmän maksimirasitukseksi 45-asteen kulmassa muodostui myös noin 170 MPa. Rasitus oli hyvin erilainen 0-asteen tilanteeseen verrattuna. Kuvasta huomataan, että kiinnitinjärjestelmän ruuviliitokseen kohdistuu hieman vähemmän rasitusta 45 asteen asennossa.

90 asteen tilanteessa tulos on todella erilainen. Runkoon kohdistuu tällöin suurin mahdollinen vääntö toisiin tilanteisiin verrattuna. Laskentatuloksista huomataan, että paikoituslaitteen ruuviliitokseen kohdistuu huomattavasti vähemmän rasitusta aikaisempiin tilanteisiin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että rasitus jakautuu tehokkaasti rungon alaprofiileita pitkin

vähentäen paikoituslaitteen ruuviliitoksen kokemaa rasitusta. Tämä näkyy kuitenkin kasvaneena rasituksena alaprofiilien välissä sijaitsevien väliprofiilien liitoskohdassa. Analyysin avulla huomataan, että liitoskohtaan muodostuu noin 220 MPa:n maksimirasitus. 90 asteen laskentatulokset on esitetty kuviossa 25.



Kuvio 25. FEM-laskentatulokset 90 asteen tilanteessa.

Laskennat suoritettiin myös toisessa ääritilanteessa, jolloin massat sijaitsivat 3,8 metrin etäisyydellä paikoituslaitteen pöytälevystä. Tällöin kuormitukset kohdistuisivat eniten kiinnitinjärjestelmän ruuviliitokseen. Laskentatulosten analysoinnin jälkeen merkittäviä eroja ei kuitenkaan huomattu kokonaisrasituksissa. Tämä johtuu siitä, että paikoituslaitteen päätyrungosta on paljon tukevampi ja kuormitukset jakautuivat laajemmin rakenteeseen. Vaikka paikoituslaitteen pöytälevy kokeekin maksimiväännön kyseisessä tilanteessa, ei se suoraan korreloi ruuviliitoksen kokemiin rasituksiin. Laskentojen avulla tarkasteltiin myös kiinnitinjärjestelmän joustoa käytön aikana.

Tuloksista huomattiin, että runko joustaa kaikista eniten 0 asteen kulmassa, joka on täysin odotettavissa oleva tulos. Tämä johtuu siitä, että rungon taivuttaminen tässä asennossa on luonnostaan helpompaa profiilien ollessa vieretysten eikä päällekkäin kuten esimerkiksi 90 asteen tilanteessa. Maksimitaipumaksi 10 000 kg massalla havaitaan 12 mm. Arvo tuntuu yhtäkkiä liian suurelta hitsaustarkkuuden kannalta. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että robotissa oleva railonseuranta pystyy korjaamaan tällaiset virheet helposti. Kiinnitinjärjestelmää ei ole myöskään kannattavaa suunnitella siten, että se taipuisi vielä vähemmän. Tämä johtuu siitä, että rakenteesta tulisi itsessään paljon raskaampi, joka vähentäisi

6 TULOKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön aikana päästiin aika lähelle työn alussa asetettuja tavoitteita. Työn aikana yritykselle suunniteltiin ja kehitettiin kiinnitinjärjestelmä uutta hitsausrobotia varten, ja se mahdollistaa monien yrityksessä hitsattavien tuotteiden kiinnityksen robotin yksiakseliseen paikoituslaitteistoon. Vaikka lopullista mitoitusta kiinnitinjärjestelmälle ei kuitenkaan päästy tekemään, saatiin työ kuitenkin siihen pisteeseen, että lopullisen mitoituksen tekeminen on helposti tehtävissä.

Työn aikana yritykselle kehitettiin myös kattava CAD-ohjelmassa rakennettu kokoonpano, jota voidaan tulevaisuudessa hyödyntää esimerkiksi robotin etäohjelmointia tehtäessä. Kokoonpanon avulla luotiin myös monipuoliset FEM-laskennat, joiden avulla yrityksessä voidaan tarkastella kiinnitinjärjestelmään kohdistuvia rasituksia poikkeuksellisten tilanteiden vastaan tullessa. Näiden lisäksi kokoonpanon avulla voidaan tulevaisuudessa kehittää kiinnitykseen tarvittavia tuotekohtaisia lisäosia.

Työn aikana luotiin myös kattavat laskentatyökalut Excel-pohjaan, joiden avulla voidaan laskea sekä visualisoida kiinnitinjärjestelmän runkoon kohdistuvia rasituksia. Laskentatyökalujen avulla voidaan tulevaisuudessa luoda esimerkiksi raja-arvokuvaajat yritykselle, joista nähdään suoraan, millaisia tuotteita kiinnitinjärjestelmään voidaan kiinnittää ilman erillistä lujuuslaskentaa.

Kaikki ei kuitenkaan työssä mennyt täysin sulavasti. Tästä hyvä esimerkki on suunnittelu- vaiheessa tehty virhe, jossa huomiota kiinnitettiin liiaksi robotin ulottuvuuteen. Tämän takia alustava malli kiinnitinjärjestelmälle oli todella epäkeskoinen ja loi aivan liian suuren paikoituslaitteen kääntöliikettä vastustavan voiman. Virhe kuitenkin huomattiin lujuuslaskentojen aloitusvaiheessa, jolloin kiinnitinjärjestelmän rakennetta muutettiin merkittävästi. Lopullinen epäkeskoisuus on kuitenkin helppo laskea tarvittavaksi luotujen laskentatyökalujen avulla.

Itse lujuuslaskentaan liittyen suurimpana haasteena oli ehdottomasti tiedonpuute sekä osittainen tietojen ristiriita. Kiinnitinjärjestelmän suunnittelun kannalta ei saatu riittäviä tietoja paikoituslaitteiston raja-arvoista tai kääntöliikkeen kiihtyvyydestä. Tästä syystä kiinnitinjärjestelmän lopullinen mitoitus jäi tekemättä. Puutteellisten tietojen merkitys esimerkiksi kiinnitinjärjestelmän rungossa muodostuviin rasituksiin on niin suuri, ettei näiden arvoja

voida olettaa työturvallisuuden kannalta. Alkuperäisenä suunnitelmana työn päättyessä oli jatkaa suoraan kiinnitinjärjestelmän valmistuskuvien piirtämiseen, mutta tämä vaihe joutuu vielä odottamaan.

Kokonaisuudessaan työ oli hyvin onnistunut. Työn aikana koetuista vaikeuksista ja hidastuksista huolimatta työn lopussa päästiin hyvin lähelle alussa luotuja tavoitteita. Työn tuloksena yritykselle tuotettiin kattava suunnitelma kiinnitinjärjestelmän toteuttamiseksi, ja se voidaan viimeistellä helposti, kun tarvittavat tiedot on saatu.

Työssä olisi voitu kehittää kiinnitinjärjestelmän kehitysvaihetta vielä eteenpäin. Tämä edellyttäisi, että Frame-ympäristössä luotujen runkoprofiilien mittasuhteiden linkitys saataisiin toimimaan kunnolla, jolloin muutokset kokoonpanoon sekä siitä tehtävään FEM-laskentaan päivittyisivät automaattisesti. Tämän lisäksi FEM-laskennassa asetettujen voimien komponentit voitaisiin linkittää luotuun Excel-pohjaan, jolloin laskentatyökaluilla tehdyt muutokset päivittyisivät automaattisesti FEM-laskentaan. Näiden toteuttamiselle oli suunnitelmia työn alussa, mutta hidasteista ja CAD-ohjelman toistuvasta kaatumisesta johtuen aikaa tämän toteuttamiseksi ei työssä jäänyt.

FEM-laskentaa voitaisiin kehittää vielä siten, että kannatinyksikön tukireaktioita paranneltaisiin hieman nykyisestä. Laskentaa varten luotiin alun perin kaksi pistemäistä tukireaktiota simuloimaan kannatinyksikön luomaa tukea. Tämä kuitenkin näkyi laskentatuloksissa erittäin terävinä huippuarvoina, jotka vaikeuttivat rungossa muodostuvien rasiusten tarkastelua. Ratkaisuksi luotiin toinen tukireaktio, joka vertailussa antaa rungon joustaa saman verran kahteen pistemäiseen tukeen verrattuna. Nykyinen tukireaktio ei kuitenkaan osoita kiinnitinjärjestelmän teräsputkessa muodostuvia rasituksia tarkasti. Toki putki on niin vahva, että lopuksi tämä ei ole merkittävä haitta. FEM-laskennassa olisi voitu kehittää myös kiinnitinjärjestelmän muodostamaa elementtiverkkoa huippuarvojen poistamiseksi.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli suunnitella ja kehittää yritykselle tulevaan hitsausrobotisoluun kiinnitinjärjestelmä, jonka avulla voidaan kiinnittää useita erilaisia työkappaleita uuden robotin hitsattavaksi. Kiinnitinjärjestelmän suunnittelun ohella tavoitteena oli luoda yritykselle riittävän tarkka CAD-malli kiinnitinjärjestelmästä, jota voidaan hyödyntää uutta robottia etäohjelmoidessa.

Työ eteni hyvällä tahdilla, vaikka matkan varrella tulikin aika paljon haasteita vastaan. CAD-mallinnuksessa ilmeni aika paljon ongelmia yhdistämällä eri ympäristössä mallinnettuja komponentteja yhtenäiseen kokoonpanoon. Pahimmillaan ongelmien takia menetettiin usean tunnin aikana tehty työ ohjelman kaatuessa. Tästä huolimatta ongelmat ratkaistiin ja ne, joihin ei löytynyt ratkaisua, saatiin kuitenkin ohitettua uusilla ratkaisuilla.

Yksi iso hidaste työssä oli tiedonpuute, sillä lujuuslaskentaa varten olisi ollut tärkeää tuntea kaikkien rajoittavien tekijöiden tarkat raja-arvot. Näiden sijaan rajoittavista tekijöistä tehtiin maltillisia oletuksia valmistajan ilmoittamien tietojen perusteella. Tästä hyvä esimerkki on kannatinyksikön kuormitukset x- ja y-askelin mukaisesti.

Toinen hidastava tekijä lujuuslaskentojen aloitukseen liittyen oli suunnitteluvaiheessa tehty virhe, jonka takia lujuuslaskentoja varten suunniteltavien laskentatyökalujen luominen jouduttiin keskeyttämään. Rakennetta suunniteltiin uudestaan, jonka tuloksena oli rakenne, joka vastasi paremmin sitä, mihin paikoituslaitteen maksimivääntö oikeasti pystyy.

Työn aikana Excel-pohjaan luodut laskentatyökalut saatiin todella hyvälle mallille. Laskentatyökalujen avulla voidaan laskea todella nopeasti kiinnitinjärjestelmän runkoon muodostuvia voimien komponentteja, joita voidaan suoraan hyödyntää kiinnitinjärjestelmän FEM-laskennassa. Laskentatyökalujen avulla lopullisten mitoituslaskemien kiinnitinjärjestelmän rungolle voidaan suorittaa nopeasti, kunhan tarvittavat tiedot saadaan robotin valmistajalta. Tämän lisäksi työkaluja voidaan hyödyntää myös tilanteissa, jossa työkappale kiinnitetään suoraan paikoituslaitteeseen ilman kiinnitinjärjestelmää, ja laskea niiden avulla esimerkiksi tukireaktioita sekä paikoituslaitteeseen kohdistuvaa vääntöä. Laskentatyökalujen valmistamisen ohella kehitettiin myös kattavat vapaakappalekuvat eri ääritilanteiden havainnollistamiseksi.

Excel-pohjan avulla saatiin laskettua suuri määrä erilaisia voimien komponentteja, joiden avulla luotiin taulukoiden mukana päivittyvät kuvaajat arvojen visualisoimiseksi, ja se helpotti kiinnitinjärjestelmän runkosuunnittelua huomattavasti. Kuvaajat auttoivat ymmärtämään, miten suuri vaikutus tietyillä muuttujilla on esimerkiksi rungossa muodostuvien voimien kannalta. Tämän lisäksi taulukoista voidaan tulevaisuudessa tulostaa kuvaajat yritykselle, ja niiden avulla voidaan suoraan määrittää, mitä tuotteita kiinnitinjärjestelmään voidaan kiinnittää.

LÄHTEET

- Aalto, H., & Kuivanen, R. (1999). *Robotiikka*. Talentum.
- Alvarin Metalli. (i.a.-a). *Alvarin Metalli Oy*. <https://www.alvarinmetalli.fi/web/alvarin-metalli-oy/>
- Alvarin Metalli. (i.a.-b). *Konekanta*. <https://www.alvarinmetalli.fi/web/konekanta/>
- Billing, M. (2023). *Teollisuusrobotti*. Teoksessa K. Välimäki, & M. Niemelä (toim.), *Teollisuuden robotiikka* (s. 117–138). Suomen Robotiikkayhdistys ry.
- Eurometalli. (29.9.2023). *Enne on nyt Tremec ja yhdessä Alvarin Metallin kanssa vahva konepajakokonaisuus*. <https://eurometalli.com/enne-on-nyt-tremec-ja-yhdessa-alvarin-metallin-kanssa-vahva-konepajakokonaisuus/>
- Hietikko, E. (2021). *Palkki: Lujuuslaskennan perusteet* (4. p.). Books On Demand.
- Hytönen, J. (10.3.2025). Punainen piste FE-mallissa? *StruSoft*. <https://strusoft.com/fi/blog/fem-design-fi-2/punainen-piste-fe-mallissa/> Keinänen, T., & Kärkkäinen, P. (2001). *Koneautomaatio 2: Logiikat ja ohjausjärjestelmät*. WSOY.
- Kemppi. (31.12.2023). *Hitsauksen ABC: Mitä hitsaus on?* <https://www.kemppi.com/fi/blogit/mita-hitsaus-on>
- Kemppi. (14.1.2024b). *Hitsauksen ABC: mig/mag-hitsaus*. <https://www.kemppi.com/fi/blogit/mig-mag-hitsaus>
- Kemppi. (19.2.2024c). *Hitsauksen ABC: Robottihitsaus*. <https://www.kemppi.com/fi/blogit/robottihitsaus>
- Kemppi. (10.3.2024a). *Hitsauksen ABC: Hitsausturvallisuus*. <https://www.kemppi.com/fi/blogit/hitsausturvallisuus>
- Latokartano, J., Karvonen, H., Skriko, T., Holmano, O., Christophe, F., Ahonen, T., Haapakoski, T., Partanen, A., Lempiäinen, J., Kapiainen, P., Paasio, L., Liljamo, J. & Närhi, J. (2023). Teollisuusrobotiikan sovelluksia. Teoksessa K. Välimäki, & M. Niemelä (toim.), *Teollisuuden robotiikka* (s. 35–73). Suomen Robotiikkayhdistys ry.
- Lempiäinen, J. (2023). Teollisuuden robotiikka Suomessa. Teoksessa K. Välimäki, & M. Niemelä (toim.), *Teollisuuden robotiikka* (s. 15–31). Suomen Robotiikkayhdistys ry.
- Lepola, P., & Makkonen, M. (2005). *Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet*. WSOY.

- METSTA. (2025). *Meistä*. <https://metsta.fi/meista/>
- Ongelin, P., & Valkonen, I. (2012). *Rakenneputket: EN 1993 -Käsikirja 2012*. Rautaruukki.
- Pemamek. (2.7.2024a). *Siirtyminen robottihitsaukseen kiihtyy*. <https://pemamek.com/fi/uutiset/siirtyminen-robottihitsaukseen-kiihtyy/>
- Pemamek. (7.6.2024b). *Technical documentation*.
- Saloranta, V. (27.2.2024). Turvallisuus, luotettavuus ja laatu – miksi hitsausteollisuus tarvitsee standardeja? SFS. <https://sfs.fi/blogi/miksi-hitsauksessa-tarvitaan-standardeja/>
- Siemens. (2020). *Solid Edge Simulation: Embedded finite element analysis for design engineers*. <https://solidedge.siemens.com/wp-content/uploads/2020/06/Siemens-SW-Solid-Edge-Simulation-FS-78032-C9.pdf>
- Siemens. (2024). *Solid Edge (Student Edition 2024)* [tietokoneohjelma]. <https://solidedge.siemens.com/en/solutions/users/students/>
- Stenbacka, N. (2011). *Hitsaustalous ja tuottavuus*. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. (Alkuperäinen teos julkaistu 2009).
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2005). *Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1–8: Liitosten mitoitus*; Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–8: Design of joints (SFS-EN 1993-1-8).
- Yaskawa Europe. (2025). *AR-sarja: AR1440*. https://www.yaskawa.fi/tuotteet/robotit/hitsausleikkaus/productdetail/product/ar1440_734