

Tuukka Palovaara

MITTAKONEEN PANOSTAMINEN YHTEISTYÖROBOTILLA

MITTAKONEEN PANOSTAMINEN YHTEISTYÖROBOTILLA

Tuukka Palovaara
Opinnäytetyö
Kevät 2021
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Tuukka Palovaara
Opinnäytetyön nimi suomeksi: Mittakoneen panostaminen yhteistyörobotilla
Opinnäytetyön nimi englanniksi: Feeding Measuring Machine with Collaborative Robot
Työn ohjaaja: Juha Junttila
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2021
Sivumäärä: 34 + 1 liite

Työ tehtiin Mectalent Oy:lle ja siinä tutkittiin yhteistoimintarobotteihin liittyviä turvallisuusasioita. Työn käytännön osuutena käyttöön otettiin Universal Robotsin UR10E-robotti, jonka työtehtävänä oli panostaa mittakonetta. Työn teoriaosuuden tuloksena saatiin ohjeistus yhteistyörobotteihin ja robottisoluihin liittyvistä riskeistä ja riskien pienentämisestä sallitulle tasolle. Mittakoneen automatisointiin liittyvät riskit kartoitettiin opinnäytetyöhön haetun tiedon avulla ja mittakoneen ja robotin muodostamasta kokonaisuudesta laadittiin turvallisuusselvitys Excel-pohjalle.

Työn sisältö pohjautuu pääosin standardeihin SFS-EN ISO 10218-2, SFS-EN ISO 12100 sekä tekniseen spesifikaatioon ISO/TS 15066. Työhön on poimittu näistä standardeista yhteistyörobotteihin ja robottisovelluksiin liittyviä riskejä, joita saattaa esiintyä robotin käytössä Mectalentilla. Tällaisia riskejä ovat esimerkiksi robotin ja työntekijän välinen kontakti sekä robottisoluun kuuluvien työkoneiden riskit. Työn sisältö on jaettu riskien erittelyyn, riskien poistamiseen sekä käytännön osuuteen.

Työn tuloksena robotti saatiin panostamaan työkappaleita mittakoneelle niin, että se kykenee mittaamaan itsenäisesti 40 kappaleen kokoisia työeriä. Robotin toiminta saatettiin riskiarviossa esiintyneiden riskien kannalta riittävän turvalliselle tasolle, jotta mittaustilan käyttöä voidaan jatkaa normaalisti robotin työskennellessä tilassa ihmisten kanssa. Turvallisuusselvityksen yhteydessä luotua dokumenttia voidaan myöhemmin käyttää hyväksi, kun robottia siirretään uusiin tehtäviin, jotka vaativat uuden riskiarvion muodostamista.

Asiasanat: yhteistyörobotti, robotiikka, turvallisuus, automaatio

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Mechanical Engineering, Machine Automation

Author(s): Tuukka Palovaara
Title of thesis: Measuring Machine Feeding with Collaborative Robot
Supervisor(s): Juha Juntila
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2021
Pages: 34 + 1 appendice

This thesis was ordered by Mectalent Ltd and it consisted of investigating collaborative robot operation safety and finding out which risks need to be acted on. This was followed with an implementation of Universal Robots UR10E collaborative robot. Robots task was to feed a measuring machine. An excel sheet for the risks regarding this specific operation was provided based on the risk investigation.

The content of this thesis theory is based mainly on standards SFS-EN ISO 10218-2, SFS-EN ISO 12100 and technical specification ISO/TS 15066. These standards were used to assess which risks could occur when using the robot in Mectalents case. For example these risks could include contact between the robot and the operator as well as risks possessed by other hazardous machines in the robot application. The theory part is divided into finding out different risks, actions required for these risks as well as the practical part.

As a result of this thesis, the robot was implemented for feeding the measuring machine. Robot is capable of independently measuring up to 40 workpieces on the measuring machine. Robots work cycle was evaluated and the risks regarding the robots functionality were made safe enough, to where the work space could still be efficiently used, even when the robot was on.

Keywords: collaborative robot, robotics, safety, automation

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 YHTEISTYÖROBOTTEIHIN LIITTYVÄT RISKIT	8
2.1 Riskit ja niiden arvioiminen	8
2.2 Erialaisten riskien tunnistaminen	10
2.2.1 Robottiin liittyvät riskit	10
2.2.2 Robottisoluun liittyvät riskit	12
2.2.3 Sovelluskohtaiset riskit	13
2.3 Työtehtävän arviointi	14
3 VAAROJEN POISTAMINEN JA RISKIEN VÄHENTÄMINEN	16
3.1 Robotin riskien poistaminen tai pienentäminen	16
3.2 Robottisolun riskien poistaminen tai pienentäminen	19
3.3 Sovelluskohtaisten riskien poistaminen tai pienentäminen	22
4 ROBOTIN KÄYTTÖÖNOTTO MITTAKONEEN PANOSTAMISEEN	23
4.1 Turvallisuusselvitys	23
4.2 Robotin sijoittaminen mittaustilaan	23
4.3 Jigin suunnitleminen työkappaleille	24
4.4 Mittakoneen toiminnan automatisointi	26
4.5 Robotin jalusta	31
4.6 Robotin ohjelma	33
4.7 Testierä	34
5 YHTEENVETO	35
LÄHTEET	36
LIITTEET	
Liite 1 Turvallisuusselvitys robotin ja mittakoneen yhteistoiminnalle	

SANASTO

integraattori	robotista ja oheislaitteista robottisovelluksen toteuttava taso
IO	input/output, rajapinta, josta saadaan signaaliviestiä robotilta ja johon voidaan tuoda ulkoisia signaaliviestejä robotille.
kollaboratiivinen	yhteistoiminta ihmisen ja robotin välillä
kvasistaattinen kontakti	operaattorin jonkin kehonosan puristuminen robotin varsien tai robottisolun väliin
operaattori	robottia käyttävä henkilö
transienttinen kontakti	operaattorin ja robotin välinen kontakti, jossa kehon osa ei jää puristuksiin vaan kykenee liikkumaan ja joustamaan kontaktin yhteydessä

1 JOHDANTO

Työn toimeksiantajana toimii oululainen Mectalent Oy, joka on päättänyt lisätä robottien hyödyntämistä omassa tuotannossaan. Tässä opinnäytetyössä perehdytään robotin turvalliseen käyttöönottamiseen ja hyödyntämiseen Mectalentin tuotannon tehostamiseksi.

Työn tavoitteena on käyttöönottaa Mectalent Oy:n tuotantoon yhteistyörobotti ja suorittaa käyttöönottoa varten turvallisuustarkastelu robotin suorittamalle työtehtävälle. Tavoitteena on, että robotti kyetään siirtämään uudelle työpisteelle ja tekemään tämän opinnäytetyön pohjalta riittävän laaja turvallisuusselvitys, jotta robotin käyttö voidaan turvallisesti aloittaa. Työn aikana myös luodaan turvallisuusselvitys robotin ja mittakoneen yhteistoimintaan. Tätä turvallisuusselvitystä voidaan käyttää jatkossa hyväksi, kun robottia siirretään ja uuden työtehtävän turvallisuutta arvioidaan.

Työn käytännön osuutena käyttöönotetaan Universal Robotsin UR10E-kollaboratiivinen robotti ja ohjelmoidaan robotille liikeradat kappaleen panostamiseksi mittakoneelle. Robotin yhteyteen tullaan lisäämään Easyroboticsin valmistama modulaarinen ProFeeder-jalusta, jolloin robotin siirtäminen paikasta toiseen helpottuu. Kappaleisiin tarttumisessa käytetään Robotiqin valmistamaa Hand-E-leukatarttujaa. Robotissa käytetään lisäksi Machine Tending Copilot -ohjelmistoa sekä robotin ranteeseen sijoitettavaa voima-anturia, jolloin robottiin saadaan käyttöön erilaisia voimanmittaukseen perustuvia ominaisuuksia.

2 YHTEISTYÖROBOTTEIHIN LIITTYVÄT RISKIT

Tässä luvussa käydään läpi ne asiat, jotka integraattorin tulee ottaa huomioon, kun robottisovelluksen turvallisuutta arvioidaan siirrettäessä robotti uuteen käyttökohteeseen. Turvallisuusselvitykseen liittyvässä riskien arvioinnissa keskitytään robotin käyttöön liittyviin riskeihin, jotka tulee huomioida, kun robotti siirretään suorittamaan tiettyä työtehtävää. Oletuksena on, että robotin käyttöönoton, mahdolliset asennustyöt, ohjelmoinnin ja huoltotoimet suorittaa henkilö, jolla on vaadittu koulutus ja kyky arvioida työhön liittyviä riskejä itse.

Yhteistyörobotti tullaan asentamaan liikuteltavalle jalustalle, jolloin sen siirtäminen tuotannon eri työvaiheiden välillä helpottuu ja robotin joustavuudesta saadaan suurin hyöty. Turvallisuusselvityksen kannalta liikuteltavuudella itsellään ei ole suurta merkitystä, koska robottikäsivartta ei tulla käyttämään jalustan liikkeessä. Universal Robotsin julkaisemassa turvallisuuswebinaarissa käsitellään yhteistyörobotia liikuteltavalla jalustalla ja webinaarissa todetaan, että mikäli robotti ei operoi jalustan liikkeessä, ei robottiin liittyviä turvallisuusseikkoja tarvitse huomioida siirtojen aikana. Tällöin riittää, että yhteistyörobotin turvallisuusselvitys tehdään erikseen jokaiseen työpisteeseen, jossa robotti operoi. (1.)

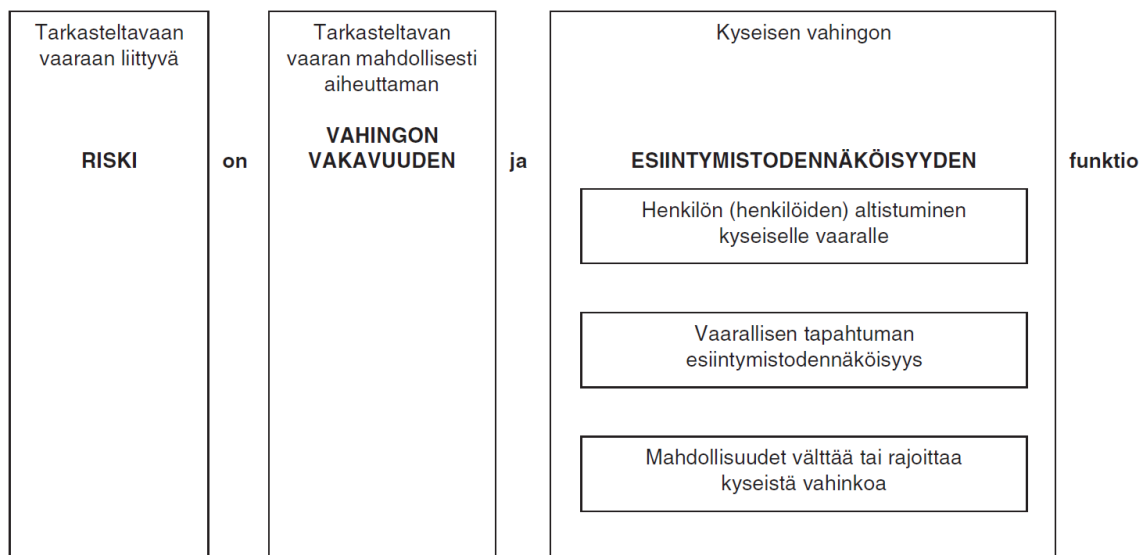
2.1 Riskit ja niiden arvioiminen

Standardi SFS-EN ISO 10218-2 listaa yhteistyörobottien käyttöön liittyviä vaatimuksia. Standardin mukaan yhteistyörobotin työskennellessä ihmisen kanssa samassa tilassa on työntekijöiden turvallisuuden varmistamiseksi suoritettava turvallisuustoimenpiteitä. Tämä johtuu siitä, ettei ihmisen ja robotin välistä työtilaa ole erotettu, vaan ihmisen ja robotin välillä on mahdollista tapahtua kontakti työkierron aikana. Näillä turvallisuustoimenpiteillä varmistetaan, ettei robotin toiminta vaaranna sen kanssa tai sen lähellä työskenteleviä ihmisiä. (2, s. 38.)

Robottijärjestelmän yleinen riskien arviointi koostuu neljästä kohdasta (2, s. 12). Nämä kohdat löytyvät robottien ja robotiikkalaitteiden turvallisuusvaatimuksia käsittelevästä standardista SFS-EN ISO 10218-2 ja ne ovat

1. robottijärjestelmän rajojen määrittäminen
2. vaarojen tunnistaminen
3. riskin suuruuden arviointi
4. riskin merkityksen arviointi. (2, s. 12.)

Vaarojen tunnistamista on tarkennettu myöhemmin vuonna 2016 julkaistussa teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 (4, s. 4 - 5). Riskien suuruuden ja merkityksen arviointiin taas on annettu ohjeistusta standardissa SFS-EN ISO 12100. Standardissa riskiä käsitellään vahingon vakavuuden ja esiintymistodennäköisyyden funktiona, joka on kuvattu kuvassa 1. (3, s. 42.)



KUVA 1. Riskin osatekijät (3, s. 42)

Standardi tarkentaa vahingon vakavuuden arviointia. Vakavuuden suuruutta voidaan arvioida esimerkiksi vammojen ja terveyshaittojen vakavuuden sekä vahingon esiintymistodennäköisyyden kautta. Vammojen ja terveyshaittojen vakavuuden arviointiin on standardissa annettu kolme esimerkkitasoa. Näitä tasoja ovat lievä, vaikea sekä kuolemaan johtava vamma tai terveyshaitta. Vahingon esiintymistodennäköisyys taas käsittelee sitä, voiko vammoja tai terveyshaittoja aiheutua yhdelle vai useammalle henkilölle, kuinka todennäköistä vahingon tapahtuminen on ja minkälaisia mahdollisuuksia henkilöllä on välttää vahinkoa. (3, s. 44.) Robotin integraattorin on hyvä käyttää näitä määritelmiä hyödyksi arvioitaessa robottisoluun liittyviä riskejä.

2.2 Erilaisten riskien tunnistaminen

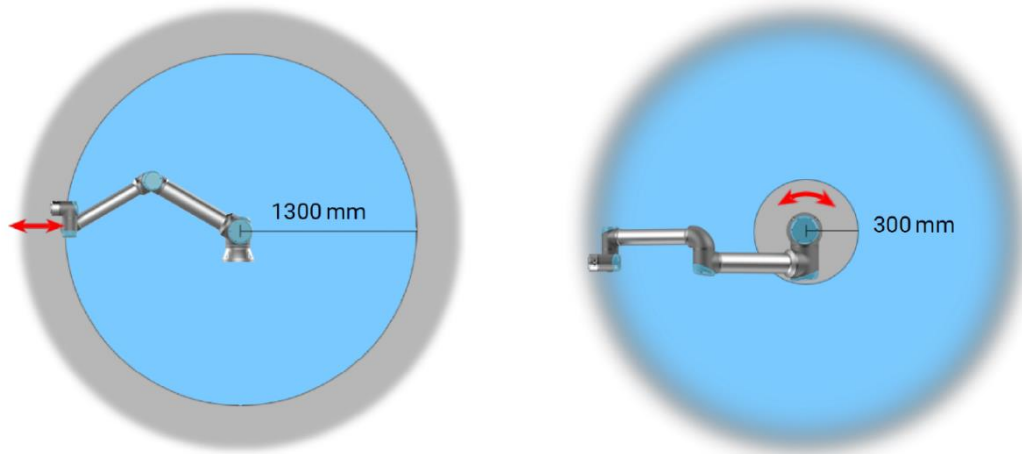
Teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 (4) on tarkennettu standardin SFS EN-ISO 10218-2 (3, s. 38 - 42.) riskiarvioprosessia yksinomaan yhteistyöroboteihin- ja robottisoluihin liittyvien ohjeiden ja vaatimusten osalta. Teknisessä spesifikaatiossa on eroteltu yhteistyöroboteihin ja kollaboratiiviseen työskentelyyn liittyviä riskejä. Nämä riskit on jaettu teknisessä spesifikaatiossa kolmeen eri luokkaan, joiden sisältö on käsitelty tämän luvun alakohdissa.

2.2.1 Robottiin liittyvät riskit

Teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 kohdassa 4.3.2 listataan robottiin liittyviin riskeihin muun muassa robotin ominaisuudet. Riskiarviota tekevän integraattorin tulee ottaa huomioon esimerkiksi robotin kuorman, nopeuden, voiman, inertian, väännön, tehon, geometrian, pinnanmuotojen sekä materiaalin vaikutus robottikohtaisiin riskeihin. (4, s. 4.)

Robotin ominaisuuksiin liittyvät riskit ovat enimmäkseen läsnä robotin ja ihmisen välisessä kontaktissa. Ihmisen ja robotin väliset törmäykset on standardissa jaettu kvasistaattisiin sekä transienttisiin kontakteihin. Kvasistaattisten kontaktien aiheuttamia riskejä liittyy robotin varteen, mikäli robotin läheisyydessä työskentelevä ihminen joutuu puristuksiin robotin varsien väliin. Transienttisiä kontakteja puolestaan voi syntyä esimerkiksi robottikäsivarren osuessa varren vieressä työskentelevää henkilöä. Riski transienttisille ja kvasistaattisille kontakteille robotin varren ja ihmisen välillä kasvaa ihmisen työskennellessä robotin kanssa tai sen lähetyvillä. (4, s. 2.)

Integraattorin tulee huomioida käytettävän robotin vaara-alue arvioitaessa robottiin liittyviä kvasistaattisia ja transienttisiä riskejä. Mectalent Oy:lla käytössä olevan UR10E-robotin ulottuvuus ja siten vaara-alue ilman työkalua ja työkalua on 1 300 mm suuntaansa robotin keskiakselilta. Robotin vaara-alue on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. UR10E-robotin vaara-alue (5, s. 26)

Robotin vaara-alueen sisällä työskenteleminen lisää olennaisesti riskiä robotin ja ihmisen kontaktille. Mikäli robotti ja ihminen eivät tee kollaboratiivisia työtehtäviä, on mielekästä suunnitella tilankäyttö niin, ettei tilassa työskentelevien ihmisten tarvitse mennä robotin vaara-alueelle. Jos tilan käyttäjät voivat kuitenkin olla yhteistoimintatilassa suorassa vuorovaikutuksessa robotin kanssa, on tila määritettävä selkeästi esimerkiksi lattiamerkinnöillä. (2, s. 39.)

Robotin ollessa joustavasti liikuteltavissa eri työpisteiden välissä on tehon ja voiman rajoittaminen mielekkäin vaihtoehto robotin turvallisuuden valvontaan. Tämä ominaisuus on Universal Robotsin roboteissa sisäänrakennettu turvaominaisuus. Ohjearvoja voimille ja paineille robotin ja ihmisen törmäyksestä on annettu teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 lopussa sijaitsevassa tutkimuksessa, Annex A:ssa (4, s. 21 - 31.). Nämä ohjearvot antavat robotin integraattorille mahdollisuuden laskea robotin liikenopeuksille ja voimille raja-arvoja turvallisen toiminnan saavuttamiseksi. Mikäli robotin suorittamaan työtehtävään liittyy suurempia riskejä, voi robotin nopeuden ja välietäisyyden valvonta esimerkiksi painemattojen tai valoverhojen avulla olla suositeltavaa.

Jotta robottia voidaan jatkossa käyttää myös yhteistoimintaan, tulee sen täyttää standardissa ISO 10218-1 yhteistoiminnalle annetut vaatimukset. Mectalentilla käytössä oleva Universal Robotsin UR10E on suunniteltu yhteistyörobotiksi, jossa nämä vaatimukset on otettu huomioon. Yhteistyösovelluksiin liittyviä riskejä on sivuttu työtehtävän arviointi -osiossa.

2.2.2 Robottisoluun liittyvät riskit

Robottisoluun liittyy muitakin kuin pelkän robottikäsivarren aiheuttamia riskejä. Teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 on listattu muun muassa robotin työkalun ja työkappaleen aiheuttamat riskit. Näitä riskejä on muun muassa ergonomisen suunnittelun puute, terävät kulmat, työkappaleen pudottaminen tai virheellinen asento sekä työkaluvaihtajan käyttäminen (4, s. 4). Integraattorin tulee riskin arviossa ottaa huomioon kappaleen muoto ja sen käsitteleminen. Kappaleeseen tarttumisen luotettavuus tulee arvioida ja integraattorin tulee varmistaa, ettei robotti menetä otettaan työkappaleeseen missään vaiheessa työkiertoa. Heikko tartunta tai virheellinen kappaleen asento robotin tarttujassa voi myös lisätä riskiä menettää kappale kesken työkierron. Kappaleen virheellinen asento voi myös saada aikaan kappaleen törmäämisen robottisolun muihin osiin.

Robotin kanssa samassa tilassa työskentelevien työntekijöiden liikkeiden ja sijainnin arvioiminen kuuluu myös robottisolun riskien arvioon (4, s. 4). Robottisolun integraattorin tulee ottaa huomioon robotin ympärillä työskentelevien ihmisten sijainti suhteessa robotin varteen, työkappaleisiin sekä robottisoluun kuuluviin työkoneisiin ja kiinteisiin rakenteisiin. Robottisolun muut koneet, ympäröivät seinät sekä rakenteet voivat esimerkiksi toimia kiinteänä suojana operaattorin sekä robotin välillä, tai vaihtoehtoisesti ne voivat myös luoda mahdollisen puristusvaaran robotin liikkuessa rakenteiden läheisyydessä.

Kvasistaattisten sekä transienttisten kontaktien arvioiminen koko robottisolussa on myös integraattorin oleellinen tehtävä. Transienttisten kontaktien arvioinnissa tulee ottaa huomioon robotin vaara-alue työkalun ja työkappaleen kanssa. Vaara-alueeksi määrittyy tässä tapauksessa robotin suurin ulottuma työkappaleen kanssa. Robottisoluun liittyy myös kvasistaattisia riskejä, kuten ihmisen jääminen puristuksiin esimerkiksi robotin varren ja jonkin kiinteän esteen, kuten työkoneen tai seinän väliin. Integraattorin tulee määrittää, minkälaiseen kontaktiin robotin lähettyvillä työskentelevä ihminen voi joutua ja mitkä ruumiinosat voivat olla kontaktissa. (4, s. 5.)

Robotin ohjauslaitteiden suunnittelu ja sijainti tulee myös ottaa huomioon (4, s. 5). UR10E-robotissa on ohjauspaneeli, jonka kautta robottia opetetaan ja josta robotin ohjelmat käynnistetään. Robotin ohjauspaneelissa sijaitsee myös hätäseispainike robotin hätäpysäytystä varten. Robottiin voidaan myös liittää ulkoisia hätäseispainikkeita sekä käynnistys- ja pysäytyspainikkeita, jolloin robotin toiminnan käynnistäminen ja pysäyttäminen saadaan suoritettua halutusta paikasta. Robotti voidaan myös asettaa kauko-ohjattuun tilaan, jolloin robottia käyttävä operaattori ei pääse muuttamaan robotin ohjelmaa, tai siihen vaikuttavia arvoja, mutta kykenee silti käynnistämään ja pysäyttämään robotin toiminnan. Tämän ohjauslaitteen sijainti on oleellinen robotin turvallisen käytön sekä mahdollisten vikatilanteiden kannalta. Ohjauslaitteeseen liittyvät väärinkäytöt, väärinymmärrykset ja viat tulee myös ottaa riskiarviossa huomioon.

Integraattorin tulee huomioida muiden robottisoluun kuuluvien työkoneiden aiheuttamat riskit. Koneet voivat olla vaarallisia käyttäjälle tai niiden turvallisuustoimenpiteitä on voitu joutua purkamaan koneen yhdistämiseksi robottisoluun (4, s. 5). Työkoneiden ja robotin yhteistoiminta voi myös vaatia esimerkiksi erillisiä sähkö- ja paineilmapiiirejä tai anturointia, jolloin näiden kytkentöjen riskit tulee ottaa huomioon. Työkoneiden välisen kommunikaation vikatilanteiden aiheuttamat riskit tulee pyrkiä poistamaan niin, ettei robotti esimerkiksi aloita liikkeitään yllättäen ja aiheuta vaaraa työkoneen luona työskentelevälle työntekijälle.

2.2.3 Sovelluskohtaiset riskit

Sovelluskohtaisia riskejä, joita integraattorin tulee huomioida riskienarvioinnissa ovat esimerkiksi työstöprosessiin liittyvät riskit, kuten lämpötila, irtoava materiaali tai hitsausroiskeet (4, s. 5). Sovelluskohtaisten riskien poistaminen voi kollaboratiivisessa operaatiossakin vaatia esimerkiksi fyysisiä suojuksia operaattorin ja robotin työkalun tai työstökoneen välille. Standardissa SFS 10218-2 mainitaan myös esimerkiksi työstön yhteydessä syntyvien höyryjen ja kaasujen, tai prosessissa käytettävien haitallisten kemikaalien vaikutus työturvallisuuteen (2, s. 39). Mikäli näitä syntyy työstön aikana, tulee integraattorin huolehtia tilan turvallisuudesta ja vaarallisten kaasujen, höyryjen

sekä pölyn poistosta. Tällaisia sovelluksia voivat olla esimerkiksi robotin käyttäminen kappaleiden liimaamiseen, maalaamiseen, hitsaamiseen tai hiontaan. Sovelluskohtaiset riskit liittyvät usein kappaleen työstämiseen ja nämä riskit tulee arvioida erikseen jokaisen työtehtävän ja työpisteen yhteydessä.

Sovelluskohtaisiin riskeihin luetaan myös esimerkiksi henkilökohtaisten suojavarusteiden käytöstä johtuvat rajoitukset (4, s. 5). Jos henkilökohtaiset suojavarusteet voivat aiheuttaa esimerkiksi näkö- tai kuulohaittoja, tulee ne huomioida riskien arvioinnissa. Myös esimerkiksi kaulassa roikkuvat kaulanauhat, korut, pitkät hiukset tai löysät vaatteet voivat tarttua robottiin tai työkappaleeseen työkierron aikana. Nämä riskit tulee poistaa tilassa työskentelevien ihmisten osalta.

2.3 Työtehtävän arviointi

Työtehtävän arvioiminen tulee tehdä yhdessä robotin käyttäjän ja tilassa työskentelevien ihmisten kanssa. Robottisolun liittyvät työtehtävät tulee tunnistaa ja dokumentoida ja kaikki niihin liittyvät ennalta-arvattavat riskit on tunnistettava (4, s. 5). Integraattorin tulee esimerkiksi selvittää, kuinka usein ihminen joutuu käymään yhteistoimintatilassa ja kauanko tilassa työskenteleminen kestää. Mikäli työtehtävää suorittaa useampi kuin yksi henkilö tulee jokainen työntekijä ottaa huomioon tässä arvioinnissa. (4, s. 5.)

Riskien kannalta oleellisia ovat myös muut yhteistoimintatilassa tapahtuvat työtehtävät (4, s. 5). Tällaisia tehtäviä voivat olla esimerkiksi yhteistoimintatilassa sijaitsevien työkoneiden käyttäminen. Työtilan suunnittelussa on pyrittävä mahdollisimman joustavaan ratkaisuun, jotta robotin työskentely ei häiritse tilan tehokasta käyttöä.

Mectalentilla käytössä olevaa UR10E-robottia voidaan käyttää yhteistyösovelluksissa. Yhteistyösovelluksissa olennainen osa työtehtävän arviointia on siirtyminen kollaboratiivisesta työskentelystä autonomiseen toimintaan (4, s. 5). Tätä osaa työtehtävän arvioinnista on käsitelty tarkemmin standardissa SFS EN-ISO 10218-2. Standardissa on vaadittu, että robotti ei saa

aiheuttaa ihmiselle vaaraa, vaihdettaessa autonomisen toiminnan ja yhteistoiminnan välillä. (2, s. 40.)

Mikäli robottia käytetään kollaboratiivisessa sovelluksessa, tulee integraattorin huomioida myös robotin liikkeen käynnistäminen yhteistoimintaoperaation jälkeen (4, s. 5). Robotin liike voi käynnistyä automaattisesti, esimerkiksi antureiden perusteella, tai manuaalisesti, jolloin robotin kanssa työskentelevä operaattori käynnistää liikkeen esimerkiksi robotin ohjaimelta. Integraattorin tulee arvioida esimerkiksi odottamattoman ja tarkoituksettoman liikkeen käynnistymisen aiheuttamat riskit.

Integraattorin tulee myös ottaa huomioon robottisolun epäergonomisesta suunnittelusta johtuvat haitat, joista voi seurata operaattorin keskittymisen herpaantuminen tai virheellinen toimintatapa (4, s. 5). Tilan käyttämisen huono suunnittelu voi johtaa turvatoimien kiertämiseen työnteon helpottamiseksi. Tila ja työkierto tulee suunnitella yhdessä tilaa käyttävien työntekijöiden kanssa niin, ettei työtehtävien automatisointi olennaisesti vaikeuta työntekijöiden toimia.

3 VAAROJEN POISTAMINEN JA RISKIEN VÄHENTÄMINEN

Tässä luvussa on annettu integraattorille ohjeita robotin- ja robottisolun riskien eliminoimiseksi. Vaarojen ja riskien poistaminen ei kuitenkaan rajoitu vain näihin kohtiin, vaan integraattorin tulee pyrkiä poistamaan kaikki havaitut riskit ja vaarat.

Robotin ja robottisolun riskien pienentäminen perustuu kolmeen kohtaan (2, s. 14). Näitä menetelmiä turvallisuuden parantamiseksi ovat

1. vaarojen poistaminen suunnittelun avulla tai niiden aiheuttamien riskien pienentäminen korvaavilla toimenpiteillä
2. turvallisuustekniset toimenpiteet, joilla estetään käyttäjää pääsemästä kosketuksiin vaaran kanssa tai varmistetaan, että vaarat on saatettu turvalliseen tilaan ennen kuin käyttäjä voi päästä kosketuksiin niiden kanssa
3. järjestämällä täydentäviä suojaustoimenpiteitä, kuten koneen käyttöä koskevat tiedot, koulutus, turvamerkinnot ja henkilönsuojaimet.

Nämä toimet on hyvä mahdollisuuksien mukaan suorittaa annetussa järjestyksessä.

3.1 Robotin riskien poistaminen tai pienentäminen

Robottiin liittyvät kvasistaattisten- ja transienttien kontaktien riskit pyritään pääsääntöisesti poistamaan tilan suunnittelun ja sijoittelun kautta. Varatoimenpiteenä kuitenkin on riskien hallitseminen rajoittamalla robotin voimaa ja tehoa. Voiman ja tehon rajoittaminen on Universal Robotsin UR10E-robotissa sisäänrakennettu ominaisuus. Nämä parametrit voidaan säätää robotin turvallisuusasetuksista ja niiden tulee olla salasanasuojattuja. Turvallisuusparametrien muuttaminen vaatii riskien uudelleen arviointia (5, s. 13). UR10E-robotin turvaparametrit on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. UR10E-robotin turvaparametrit (5, s. 16)

Safety Function	Description
Joint Position Limit	Sets upper and lower limits for the allowed joint positions.
Joint Speed Limit	Sets an upper limit for joint speed.
Safety Planes	Defines planes, in space, that limit robot position. Safety planes limit either the tool/end effector alone or both the tool/end effector and the elbow.
Tool Orientation	Defines allowable orientation limits for the tool.
Speed Limit	Limits maximum robot speed. The speed is limited at the elbow, at the tool/end effector flange, and at the center of the user-defined tool/end effector positions.
Force Limit	Limits maximum force exerted by the robot tool/end effector and elbow in clamping situations. The force is limited at the tool/end effector, elbow flange and center of the user-defined tool/end effector positions.
Momentum Limit	Limits maximum momentum of the robot.
Power Limit	Limits mechanical work performed by the robot.
Stopping Time Limit	Limits maximum time the robot uses for stopping after a protective stop is initiated.

UR10E-robotin säädettävissä turvaparametreissa sijaitsee kohta Force Limit. Säättämällä kohdan arvoa voidaan vaikuttaa robotin käyttämään suurimpaan mahdolliseen voimaan kvasistaattisissa kontaktitilanteissa. Suurin sallittu voima saadaan laskettua teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 mainitun Annex A -tutkimuksen avulla. Turvaparametreista voidaan säätää myös suurin sallittu nopeus kvasistaattisten kontaktien varalle.

Annex A:ssa on annettu taulukko eri ruumiinosiin kohdistuvista suurimmista sallituista paineista. Taulukon tuloksien sallitut paineet on laskettu noin 2 cm² kokoisen puristumisalueen mukaan. Tämänkokoinen alue on verrattavissa käytössä olevan robottisolun mahdollisiin puristusalueisiin. Taulukossa pienin sallittu voima on 65 N kasvoihin kohdistuvassa kvasistaattisessa kontaktissa. Kasvoihin kohdistuva kvasistaattinen kontakti on kuitenkin robotin liikeratojen ja robottisolun sijoittelun ansiosta erittäin epätodennäköinen. Mahdollisia robotin kvasistaattisia kontakteja on enimmäkseen työntekijän käden jääminen

puristuksiin robotin kuljettaman työkappaleen ja jigin väliin. Tällainen tilanne voi syntyä työntekijän mennessä robotin vaara-alueelle pysäyttämättä robotin toimintaa. Annex A:ssa esitetyn taulukon (taulukko 2) mukaan suurin sallittu kvasistaattisessa kontaktissa käsiin kohdistuva voima on 140 N. Tätä 140 N voimaa on käytetty robotin asetuksissa turvarajana. (4, s. 25.)

TAULUKKO 2. Annex A:ssa määritetyt biomekaaniset rajat (4, s. 25)

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a p_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	300	140	2	2
	18	Forefinger pad ND	270		2	
	19	Forefinger end joint D	280		2	
	20	Forefinger end joint ND	220		2	
	21	Thenar eminence	200		2	
	22	Palm D	260		2	
	23	Palm ND	260		2	
	24	Back of the hand D	200		2	
	25	Back of the hand ND	190		2	
Thighs and knees	26	Thigh muscle	250	220	2	2
	27	Kneecap	220		2	
Lower legs	28	Middle of shin	220	130	2	2
	29	Calf muscle	210		2	

Robotin transienttisiä riskejä on hallittu liikenopeuksien avulla. Annex A - tutkimuksen lopussa on esitetty taulukko, johon on laskettu suurimpia sallittuja esimerkinopeuksia eri kehonosiin kohdistuville transienttisille kontakteille. Robotin transienttiset kontaktit ovat muiden turvatoimien jälkeen epätodennäköisiä ja tästä syystä transienttisiä kontakteja laskiessa on käytetty Annex A:ssa mainittuja esimerkinopeuksia. Käytössä olevan robotin laskennallinen massa työkalun ja -kappaleen kanssa on 17,2 kg. Ohjeet laskennallisen massan saamiseksi on esitetty Annex A:ssa (4, s. 29). Varmuuden lisäämiseksi käytetään taulukosta 20 kg laskennallisen massan omaavaa robottia. Tapahtuvan kontaktialueen pinta-ala on esimerkissä 1 cm² suuruinen, joka on hieman pienempi, kuin robotin tai sen työkappaleen pienin mahdollinen

kosketus pinta-ala. Taulukossa olevien arvojen käyttäminen siis lisää varmuutta todellisiin arvoihin verrattuna.

Robotin ja mittakoneen muodostamassa robottisolussa todennäköisimpänä pidetty kohta transienttiselle kontaktille olisi olkapää tai käsi. Tällainen kontakti voi syntyä, mikäli työntekijä menee robotin vaara-alueelle pysäyttämättä robotin ohjelmaa. Taulukon mukaan pienin sallittu nopeus on kuitenkin laskettu rintaan tapahtuvan kontaktin perusteella. Tämä nopeus on 400 mm/s, olkapäähän kohdistuvan kontaktin sallitun nopeuden ollessa hieman tätä suurempi. Robotin ohjelman liikenopeudet ovat noin puolet sallitusta nopeudesta. Suurin ohjelmakierron aikana saavutettu nopeus on 250 mm/s. Robotin suurimmat sallitut liikenopeudet on esitetty taulukossa 3. (4, s. 30.)

TAULUKKO 3. Transienttisten kontaktien suurimmat sallitut nopeudet (4, s. 30)

Body region	Speed limit as a function of robot effective mass, based on maximum pressure value with an area of 1 cm ²					
	mm/s					
	1	2	5	10	15	20
Hand/finger	2 400	2 200	2 000	2 000	2 000	1 900
Lower arm	2 200	1 800	1 500	1 400	1 400	1 300
Upper arm	2 400	1 900	1 500	1 400	1 300	1 300
Abdomen	2 900	2 100	1 400	1 000	870	780
Pelvis	2 700	1 900	1 300	930	800	720
Upper leg	2 000	1 400	920	670	560	500
Lower leg	1 700	1 200	800	580	490	440
Shoulders	1 700	1 200	790	590	500	450
Chest	1 500	1 100	700	520	440	400

3.2 Robottisolun riskien poistaminen tai pienentäminen

Lähtökohtaisesti robotti ei tule mittakoneella suorittamaan työtehtäviä yhdessä ihmisten kanssa, joten tarvetta robotin vaaravyöhykkeelle menemiseen ei käytön aikana ole. Riskiä joutua vahingossa robotin vaaravyöhykkeelle tulee mahdollisuuksien mukaan kuitenkin estää robottisolun sijoittelun sekä lattiamerkkausten ja työntekijöiden ohjeistamisen avulla. Näin vahingon esiintymistodennäköisyys jää pieneksi.

Riski robotin vaaravyöhykkeelle joutumisesta kasvaa kuitenkin, jos operaattorin tulee robotin toiminnan aikana käyttää esimerkiksi robotin vieressä tai yhteydessä sijaitsevia työkoneita. Tässä tapauksessa tulee robotin yhteydessä työskentelevän työntekijän kyetä turvallisesti pysäyttämään robotti vaaravyöhykkeellä toiminnan ajaksi. Operaattorin saavutettavissa on myös oltava robotin pysäyttävä hätä-seis-painike vikatilanteita varten. Jotta operaattori kykenee helposti ja turvallisesti pysäyttämään robotin toiminnan, on robotin yhteyteen liitetty painikekotelo, jossa on painikkeet robotin liikkeen pysäyttämiseksi ja jatkamiseksi sekä hätä-seis-painike. Painikekoteloon on kiinnitetty magneetit, joilla se voidaan helposti kiinnittää kunkin robottisovelluksen kannalta otolliseen paikkaan.

Koska robottiin ei tulla liittämään ulkoisia turvalaitteita, eikä robotin työtilaa aidata, tulee robottijärjestelmän sijoittelu korostumaan robotin turvallisen käytön saavuttamiseksi. Robotti tulee mahdollisuuksien mukaan sijoittaa niin, että tilassa työskentelevät ihmiset eivät joudu robotin vaara-alueelle. Mikäli mahdollista, olisi robotin työskentelyalue hyvä sijaita paikassa, jonka lävitse ei tarvitse kulkea robotin työkiertojen aikana. Ergonomia ja turvallisuussyistä esimerkiksi työkappaleita sisältävät teholavat tulisi sijoittaa tilassa työskentelevien henkilöiden ja robotin väliin. Tällaisella sijoittelulla lavat toimivat kiinteänä esteenä robotin vaara-alueen ja ihmisten välissä. Kyseinen sijoittelu helpottaa myös lavojen vaihtamista työerien valmistuttua.

Robottijärjestelmän eri komponenttien sijoittelussa on oleellista se, että sama sijoittelu voidaan jatkossa toistaa, kun robotti siirretään takaisin kyseiselle työpisteelle. Näin robottia ei tarvitse uudelleen ohjelmoida ja aiemmin kyseisellä työpisteellä tehtyä turvallisuusselvitystä voidaan käyttää hyödyksi. Hyvä käytäntö onkin lisätä työpisteelle kiinteät paikat tai lattiamerkinnät, joiden avulla teholavat sekä siirrettävä yhteistyörobotti voidaan myöhemmin siirtää takaisin samaan paikkaan. Robotin jalustaan on kiinnitetty paikoitusjärjestelmä, jolla robotti voidaan kiinnittää lattiaan kiinteästi pultattuihin paikoituslevyihin. Näin robotti saadaan helposti siirrettyä samalle paikalle kerta toisensa jälkeen, eikä robotin jalusta pääse siirtymään robotin käytön aikana. Lattiaan kiinnitetyt paikoituslevyt ovat matalaprofiilisia kompastumisriskin pienentämiseksi.

Robotin käsittelemät kappaleet ovat enimmäkseen muutaman kilon painoisia metalli- tai muoviosia. Kappaleisiin tullaan tarttumaan käyttäen joko Robotiqin valmistamaa Hand-E-leukatarttujaa tai Epick-alipainetarttujaa. Robotin työtehtävää vaihtavan operaattorin tulee osata liittää eri työtehtävien vaatimat tarttumat robottiin ja kytkeä tarttujen tarvitsema käyttövoimanlähde turvallisesti (2, s. 18). Robottikäsitteeseen ei tulla lähtökohtaisesti liittämään sellaisia työkaluja, joista aiheutuisi loukkaantumiseriskiä robotin käyttäjälle tai robotin asennusta ja ohjelmointia suorittavalle henkilölle (esim. leikkureita), joten erillisiä turvakatkaisijoita työkaluille ei tarvita. (5, s. 13.)

Standardi SFS-EN ISO 10218-2 asettaa robottiin liitettävälle toimilaitteille tiettyjä vaatimuksia. Kohdassa 5.3.10 mainitaan muun muassa energiasyötön menetys tai muutos (2, s. 18). Tällainen vikatilanne ei saa aiheuttaa kuorman irtoamista siten, että se voi aiheuttaa vaarallisen tilanteen. Häätöpysäytystilanteessa Hand-E-tarttuja säilyttää tartuntansa kappaleeseen. Käytettäessä E-Pick-alipainetarttujaa tulee operaattorin varmistaa, että robotin häätöpysäytyksen vaikutus tarttujaan ei aiheuta vaaratilannetta. Mikäli tarttuja on kiinnitetty robotin työkaluliittimeen, painettaessa hätä-seis-painiketta tarttujan alipaine katoaa, jolloin tarttuja menettää otteensa työkappaleeseen. Tarttujan saadessa käyttövirtansa robotin ohjauskeskuksen sähköliitännöistä, tarttuja pysyy käynnissä ja ote kappaleeseen säilyy häätöpysäytyksen yhteydessäkin (6, s. 14). Tarttujen tulee myös soveltua niillä käsiteltäville työkappaleille, eivätkä työkappaleen ja työkalun aiheuttamat staattiset ja dynaamiset voimat saa ylittää robotin kapasiteettia. (2, s. 18.)

Jos robottisolun muut työkoneet voivat aiheuttaa riskejä tilassa työskenteleville ihmisille, tulee niiden aiheuttamat vaaralliset riskit poistaa. Mikäli työkoneen ja robotin yhteistoiminnan saavuttamiseksi on jouduttu purkamaan työkoneen omia turvallisuustoimenpiteitä, tulee integraattorin korvata nämä turvallisuustoimet yhteistoimintasovellukseen sopivilla vastaavilla toimilla. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi, jos robotilla hiotaan kappaletta ja hiomakoneen suojuksia on jouduttu poistamaan robotin liikkeiden mahdollistamiseksi.

Robotin yhteyteen on erilaisten sähkökäyttöjen mahdollistamiseksi rakennettu erillinen sähköpiiri. Tämä piiri koostuu virtalähteestä sekä releistä, joiden kautta robotti voi ohjata esimerkiksi paineilmaventtiileitä, moottoreita sekä suurempaa virtaa vaativia työkaluja. Erilliseen sähköpiiriin liittyvät riskit on otettava robottisolun riskien hallinnassa huomioon. Jotta sähköpiiristä on saatu turvallinen ja liian sekä kosteuden kestävä, on kaikki avoimet kytkennät suljettu tiivistetyn asennuskotelon sisään. Robotin ja kotelon päähän on myös tehty tarpeelliset vedonpoistot ja kytkennöissä on käytetty öljynkestävää kaapelia. Näin on varmistettu sähköpiirin soveltuvuus tuotannossa käytettyjen työkoneneiden yhteydessäkin.

Mittakoneelle on lisäksi lisätty paineilmapiiri, jota ohjaamalla robotti voi avata ja sulkea kappaleiden kiinnittämiseen tarkoitettua leukapakkaa. Paineilmapiirin syöttöilma on väliaikaisesti tuotu järjestelmään lattialla kulkevaa letkua pitkin. Letku on teipattu maahan kompastumisriskin pienentämiseksi. Jatkossa mittakoneen yhteyteen tullaan kuitenkin tuomaan oma paineilmasyöttö, jolloin lattialla kulkevat letkut voidaan poistaa. Paineilmapiiri on lisäksi suunniteltu niin, että paine järjestelmässä voidaan helposti katkaista ja poistaa.

3.3 Sovelluskohtaisten riskien poistaminen tai pienentäminen

Sovelluskohtaisten riskien poistaminen tulee suorittaa sovelluskohtaisen riskiarvion pohjalta. Vaadittavat toimet, kuten tilan ilmastointi tai suojat irtoavan materiaalin sekä hitsausroiskeiden varalle on lisättävä sovelluskohtaisten riskien saattamiseksi hyväksytylle tasolle. Sovelluskohtaisten riskien poistamisessa integraattorin tulee myös huolehtia esimerkiksi kaulassa roikkuvien avainten ja tunnistuskorttien poistamisesta robotin luona työskenneltäessä. Integraattorin tulee tällaisten riskien yhteydessä järjestää tarvittava ohjeistus robotin riskeistä, jotta tilaa käyttävät työntekijät sekä esimerkiksi tilassa työskentelevät siivoojat osaavat toimia turvallisesti.

4 ROBOTIN KÄYTTÖÖNOTTO MITTAKONEEN PANOSTAMISEEN

Tässä luvussa käsitellään tämän opinnäytetyön käytännön osuutta, joka on robotin käyttöönoton yhteyteen. Tarkoituksena oli automatisoida kappaleiden syöttäminen mittakoneelle niin, että robotti voi työskennellä itsenäisesti esimerkiksi öisin ja käyttää lavallisen kappaleita mitattavana.

4.1 Turvallisuusselvitys

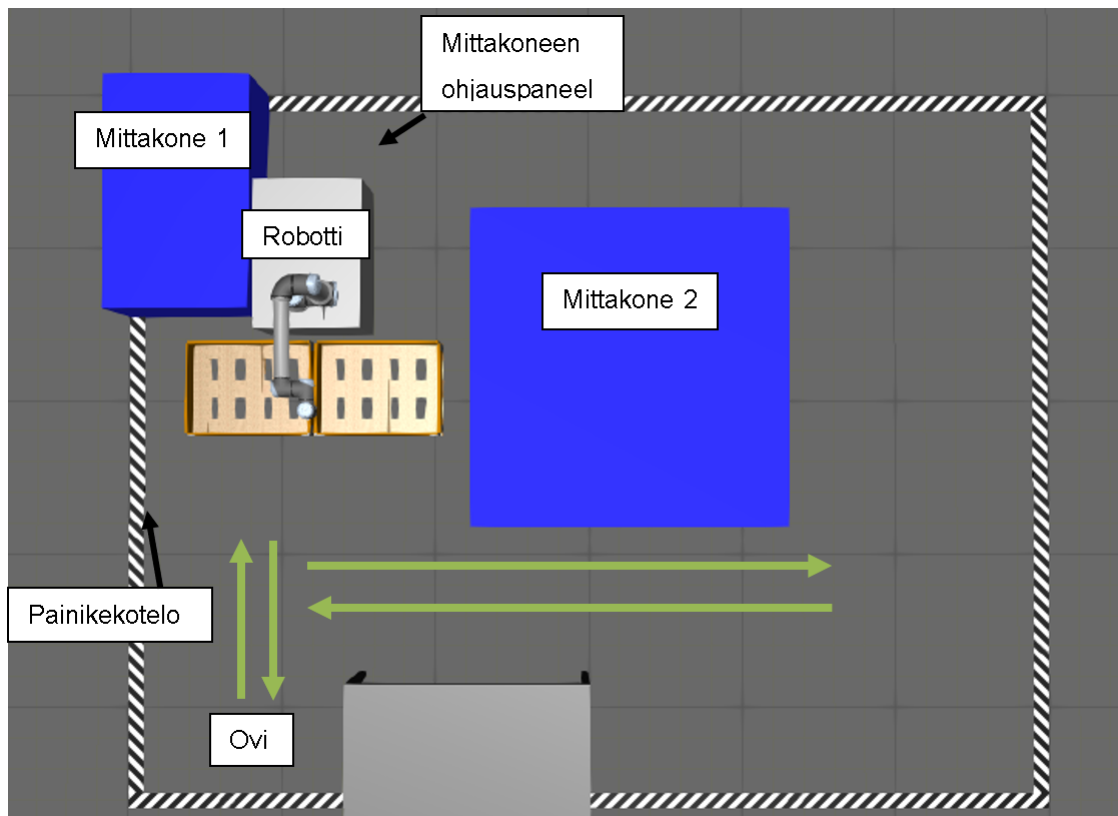
Ennen robotin käyttöönottoa suoritettiin mittakoneen ja robotin muodostamalle robottisolulle turvallisuusselvitys. Turvallisuusselvitys aloitettiin määrittämällä robottiin sekä robottisoluuun liittyvät riskit luvussa 2 kirjattujen ohjeiden mukaan. Lukua 3 käytettiin sen jälkeen tarvittavien turvallisuustoimenpiteiden kartoittamiseen. Turvallisuusselvitys tehtiin Excel-pohjalle, johon merkattiin havaitut riskit sekä toimet niiden pienentämiseksi hyväksytylle tasolle. Tämä Excel-taulukko on esitetty työn lopussa liitteessä 1.

4.2 Robotin sijoittaminen mittaustilaan

Robotin työskentelytilan sijoittelulla pyrittiin luomaan mahdollisimman turvallinen ja helppokäyttöinen ratkaisu mittakoneen panostamiseksi. Robotti sijoitettiin mittakoneen viereen ja lavat mitattaville sekä valmiille kappaleille sijoitettiin robotin eteen poikittain. Lavat tarjoavat fyysisen esteen tilassa työskentelevien ihmisten sekä robotin väliin. Erillisiä lavoja käytettiin prosessin selkeyttämiseksi. Prosessin aikana toisella lavalla on vain mittaamattomia kappaleita ja toisella vain mitattuja kappaleita. Tämä pienentää riskiä kappaleiden sekoittumisesta, jos niitä pitää käsitellä kesken mittaussarjan. Tällaisella sijoittelulla lavat on myös helppo siirtää paikalleen pumppukärryn avulla ja robotin ulottuma riittää kaikkiin kappaleen sijainteihin. Robotin käsivarsi ei myöskään kyseisestä sijainnista yllä tilassa sijaitseville kulkuväylille, jolloin robotti ei aiheuta riskejä tilan muussa käytössä.

Robottiin liitettiin ulkoiset käynnistys-, pysäytys- sekä hätä-seis-painikkeet. Tämä painikekotelo sijoitettiin tilan tyhjälle seinällä lähelle ovea. Näin robotti saadaan tarvittaessa pysäytettyä turvalliselta etäisyydeltä. Tämä voi olla tarpeen, jos operaattorin tarvitsee suorittaa työtehtäviä tai tarkistustoimenpiteitä mittakoneen ohjauspaneelilla, joka sijaitsee robotin takana.

Robottisolun sijoittelu suunniteltiin Visual Components Premium -ohjelmistolla ja on esitetty kuvassa 3 olevassa ruudunkaappauksessa. Tilassa sijaitsevat kiinteät objektit on nimetty kuvaan. Robotti syöttää kappaleita mittakone 1:lle. Kulkuväylät on merkitty kuvaan vihreillä nuolilla.



KUVA 3. Mittaustilan layout-suunnitelma Visual Components -ohjelmalla

4.3 Jigin suunnitleminen työkappaleille

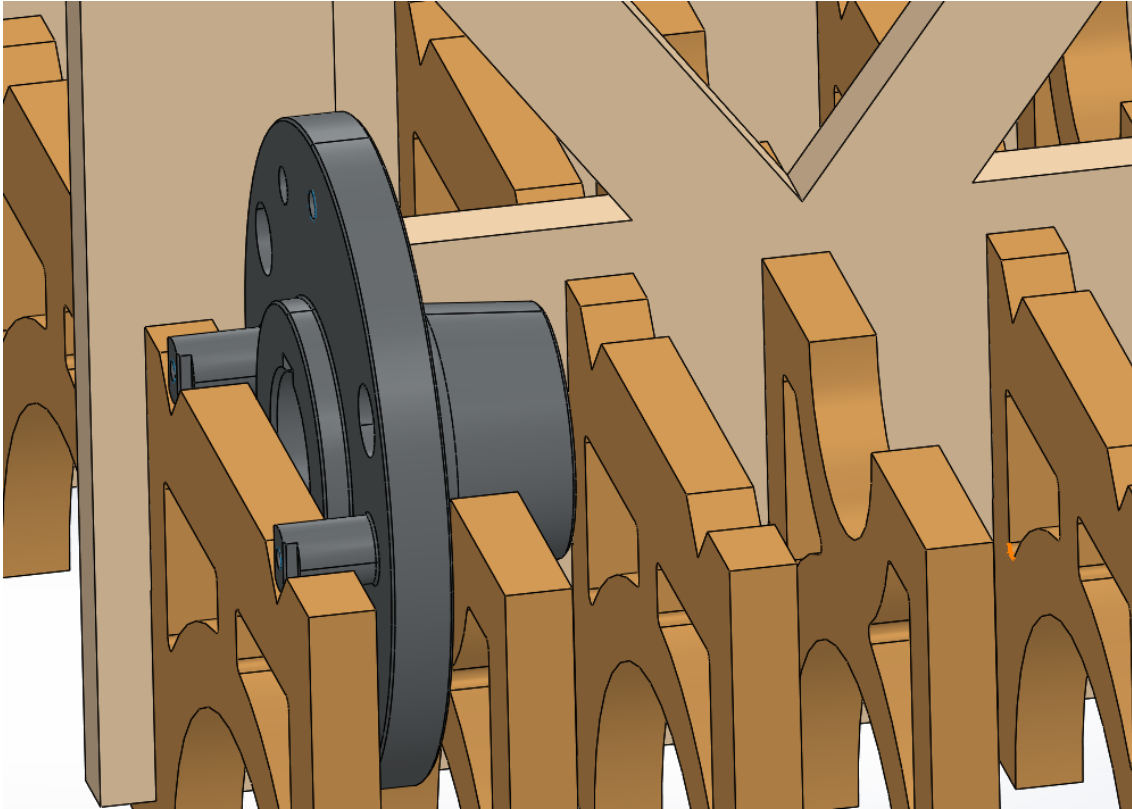
Ensimmäinen mittakoneelle syötettävä osa on Rotation Brake Disk. Näiden kappaleiden syöttämistä ja kuljettamista varten opinnäytetyön yhteydessä suunniteltiin tehokas mahtuva kehikko, jonka avulla suuri määrä kappaleita saatiin asemoitua lavalle tarkasti. Kappaleiden säännöllinen asemointi

mahdollistaa tehokkaan kappaleiden poimimisen robotilla. Kyseinen kehikko eli jigi valmistettiin 12 mm vanerilevystä vesileikkaamalla. Levyt liimattiin sen jälkeen toisiinsa ja kokoonpano sijoitettiin teholavalle lavakauluksen kanssa. Jigiin mahtuu yhteensä 40 työkappaletta. Tämä määrä riittää noin 5 tunnin yhtäjaksoiseen operointiin. Valmis jigi lavalla on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Valmis jigi paikoillaan lavalla

Jigit on suunniteltu niin, että niitä voidaan asettaa päällekkäin kerroksiksi. Näihin levyihin on myös leikattu kevennyksiä jigin painon laskemiseksi. Kuva työkappaleen asemoinnista jigiin on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Työkappale jigissä

4.4 Mittakoneen toiminnan automatisointi

Kappaleiden panostaminen mittakoneelle aloitettiin suunnittelemalla, miten kappaleet saadaan luotettavasti pysymään paikoillaan mittaustapahtuman ajan. Ensiksi ajateltiin robotin laskevan työkappaleen mittakoneen pöytätasoa vasten. Ajatuksena oli, että robotti pitäisi kiinni kappaleesta koko mittaustapahtuman ajan. Tämä kuitenkin osoittautui epäluotettavaksi tavaksi, sillä mikäli robotti tai esimerkiksi lattia robotin ympärillä tärähtää mittaustapahtuman aikana, saattaa robotin varren päässä sijaitseva työkappale liikahtaa niin, että mittaustulos vääristyy. Asiaa kokeiltiin käytännössä mittakellon avulla niin, että kappaletta

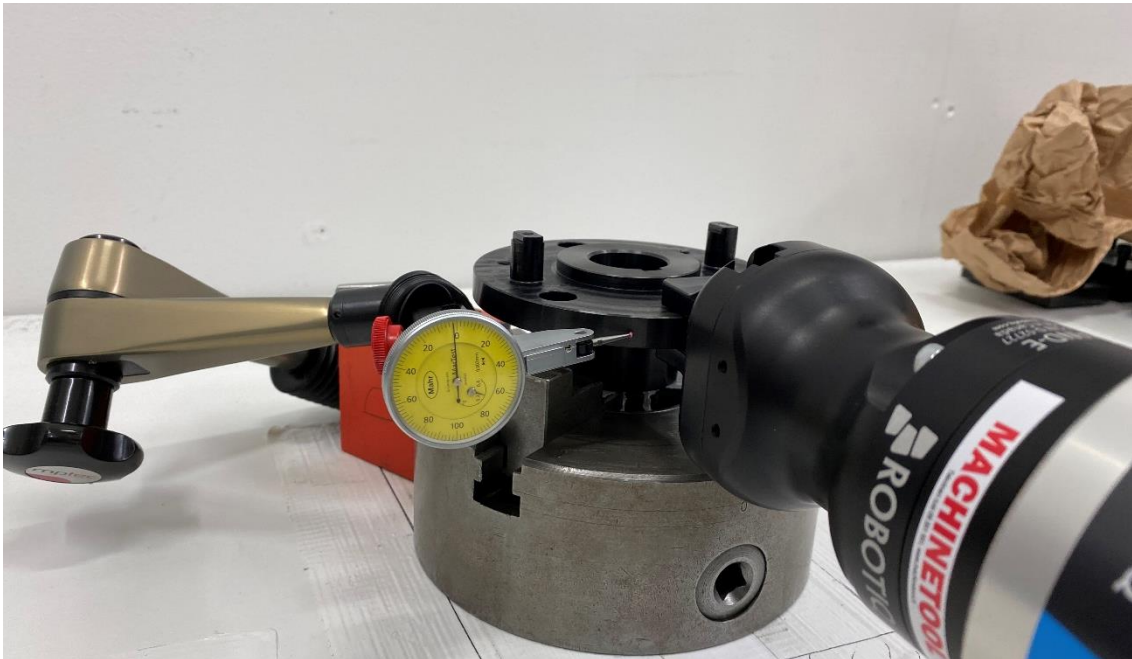
pidettiin paikoillaan robotilla samalla, kun robotin jalustan ympärillä käveltiin. Mittauksen toteuttaminen on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Mittaustarkkuuden selvittäminen

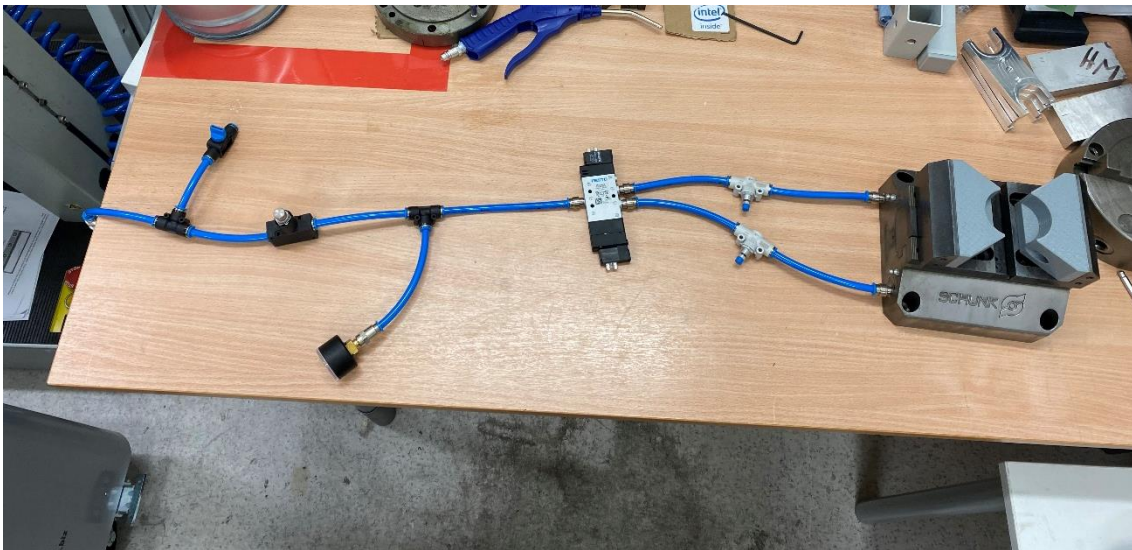
Robotin jalustan ympärillä käveleminen sai aikaan useiden sadasosamillimetricien heilahteluja, joka lisäsi mittausepävarmuutta yli hyväksytyyn tason. Mittauksia

otettiin useista eri kohdista, eri puolilta kappaletta. Mittaustapahtuma on esitetty kuvassa 7.



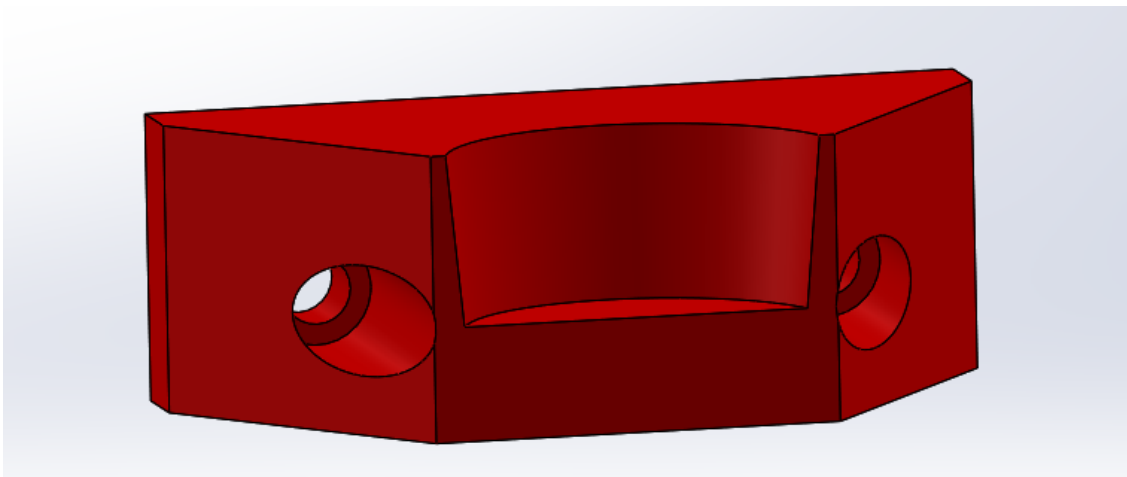
KUVA 7. Heilahtelujen mittaaminen mittakellolla

Mittatulosten perusteella päätettiin, että varmempi keino on laskea kappale leukapakkaan ja kiinnittää se mittauksen ajaksi. Jotta työkappaleen kiinnitys mittakoneelle saatiin automatisoitua, hankittiin sen yhteyteen paineilmakomponentteja, joita robotti kykenee ohjaamaan. Käytössä oli Schunkin valmistama paineilmatoiminen leukapakka, jonka ohjaamiseksi hankittiin Feston valmistama solenoidiventtiili. Robotin IO:n kautta saatiin ohjattua venttiilin toimintaa, jolloin robotti kykenee hoitamaan kappaleen kiinnityksen mittauksen ajaksi. Samalla hankittiin myös muut tarvittavat paineilmakomponentit leukapakan paineen sekä nopeuden säätämiseen. Käytetty paineilmapiiri on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Paineilmajärjestelmä koottuna testikäyttöä varten

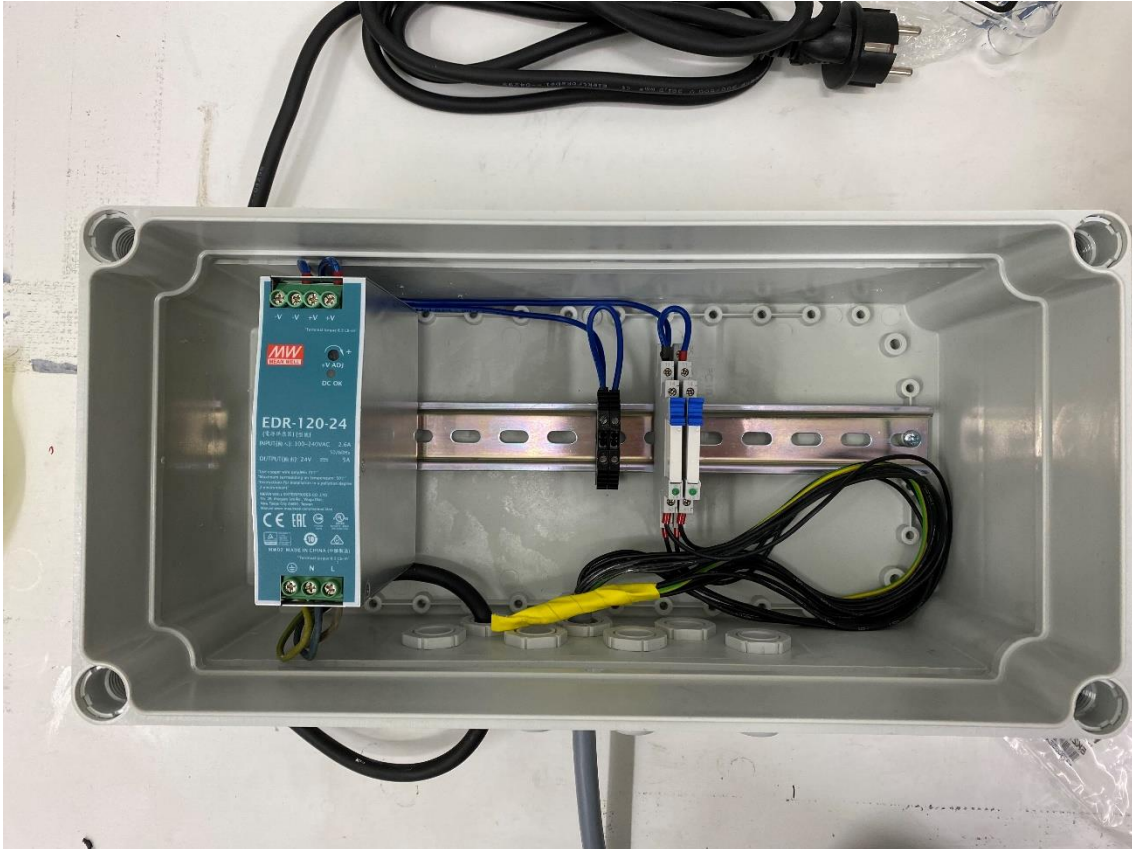
Leukapakkaan suunniteltiin ja 3D-tulostettiin lisäksi työkappaleelle soveltuvat pehmeät leuat. Leuat on muotoiltu työkappaleen mukaan, ja ne pitävät kappaleen tukevasti paikoillaan mittauksen ajan. Yhden leuan 3D-malli on esitetty kuvassa 9.



KUVA 9. 3D-malli pehmeästä leuasta paineilmatoimiseen pakkaan

Paineilmajärjestelmän lisäksi robotin yhteyteen lisättiin sähköpiiri, jossa on erillinen 24 voltin jännitteellä toimiva hakkurivirtalähde sekä releitä. Tämä tehtiin robotin suojelemiseksi esimerkiksi ylivirran tai oikosulun varalta. Virtalähteen tarjoama 5 ampeerin virta on myös huomattavasti robotin omaa maksimivirtaa

suurempi, jolloin releohjauksen kautta robotti kykenee käyttämään tehokkaampia sähkölaitteita tarvittaessa. Sähköpiiri sijoitettiin omaan koteloonsa ja järjestelmä on tehty öljyn- sekä liankestäväksi. Öljyn- sekä liankeston ansiosta sähköpiiri soveltuu käytettäväksi myös tuotantotiloissa, mikäli robotti siirretään jatkossa esimerkiksi palvelemaan muita työstökoneita. Sähköpiiri on esitetty kuvassa 10.

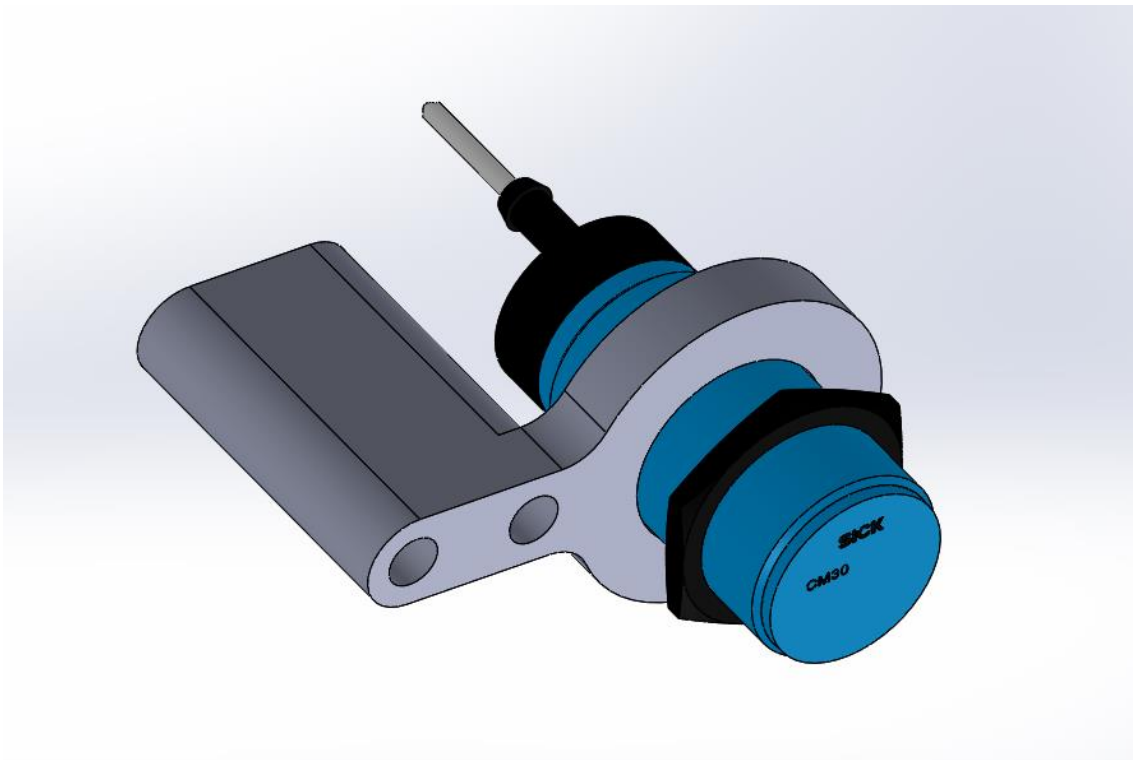


KUVA 10. Sähkökytkennät kotelossaan

Yksi automatisoinnin ongelmista oli aluksi mittakoneen mittausohjelman käynnistäminen robotin toimesta. Käytetty mittakone ei lähtökohtaisesti tarjoa IO-liitäntöjä, joilla robotin ja mittakoneen välinen tiedonsiirto saataisiin suoritettua. Tämä ongelma saatiin kuitenkin kierrettyä käynnistämällä mittausohjelma mittakoneen käsiohjaimelta, Return-painiketta painamalla. Ohjelman käynnistäminen käsiohjaimelta vaatii mittakoneen käyttämisen automaattisessa tilassa.

Mittausohjelman päätteeksi tulos mittauksesta tallennetaan pilvipalveluun ja mittakärki ajetaan mittakoneen koordinaatiston reunaan, jossa sen sijainti

tarkistetaan kapasitiivisella anturilla. Näin varmistutaan, että mittaus ei ole käynnissä ja robotti voi aloittaa kappaleen noutamisen. Varmuuden vuoksi robotti on myös ohjelmoitu odottamaan kappaleen mittaukseen kuluva aika, ennen kuin se odottaa anturilta signaalia. Käytetty anturi on Sickin valmistama CM30-25NPP-EW1 ja anturille 3D-tulostettiin teline, jolla se saatiin kiinnitettyä mittakoneen työkalukiskoon. Teline ja anturi on esitetty kuvassa 11.



KUVA 11. 3D-Malli anturista pidikkeessä

Anturin kiinnittäminen työkalukiskoon osoittautui kuitenkin huonosti toimivaksi ratkaisuksi, minkä seurauksena anturi siirrettiin pystyyn mittakoneen tasolla sijaitsevan leukapakan viereen. Mittakoneen kärki ajettiin jokaisen ohjelmakierron päätteeksi anturin päälle.

4.5 Robotin jalusta

Jotta yhteistyörobottia saadaan joustavasti liikuteltua eri työpisteiden välillä, hankittiin robotin yhteyteen EasyRoboticsin valmistama ProFeeder Flex -jalusta. Jalusta liikkuu omilla pyörillään, jolloin sen liikuttelu on helppoa. Robotin

ohjauskeskus saadaan sijoitettua kärryn sisään ja kyljessä on läpiviennit tarvittavien kaapelointien saattamiseksi keskukselle. Jalustaan saadaan myös kiinnitettyä erilaisia telineitä kappaleiden syöttämiseksi robotille.

Jalustan kylkeen lisättiin myöhemmin myös paikoitusjärjestelmä, jolla robotti saadaan ankkuroitua lattiaan kiinnitettyihin metallilaattoihin. Lattiaan ankkuroidut laatat ovat matalaprofiilisia, jolloin niiden aiheuttama kompastumisriski on vähäinen. Robotti jalustalleen asennettuna on esitetty kuvassa 12.



KUVA 12. Robotti jalustallaan

4.6 Robotin ohjelma

Robotin ohjelma aloitettiin luomalla työkoordinaatit mittakoneelle sekä kappaleiden syöttö- ja poistolavoille. Ohjelmassa käytetyt liikkeet sidottiin näihin

koordinaatistoihin, jolloin liikkeiden hienosäätäminen jatkossa, esimerkiksi lavojen ollessa hieman eri paikoilla, on helppoa. Tämä onnistuu asettamalla robotin features -osiosta löytyvien työkoordinaatistotasojen sijainnit näyttämällä robotin tarttujan avulla robotille jigin sijainti.

Ohjelman alussa käyttäjä syöttää mitattavan kappalemäärän. Ohjelma käynnistetään robotin painikekotelon käynnistuspainikkeesta, jonka jälkeen robotti aloittaa ohjelman poimimalla kappaleiden syöttölavalta kappaleita yksi kerrallaan. Robotti tarttuu kappaleeseen ja varmistaa onnistuneen tartunnan mittaamalla tarttujan leukojen välin. Kappaleen poimimisen jälkeen robotti vie kappaleen mittakoneelle, sulkee paineilmapakan leuat ja irrottaa otteensa kappaleesta. Tämän jälkeen robotti käynnistää ohjelman mittakoneen käsiohjaimelta.

Robotin odotettua kappaleen mittaukseen kuluvan ajan, se tarkistaa anturilta, onko mittakoneen kärki turvallisessa paikassa kappaleen noutoa varten. Signaalin tarkistamisen jälkeen robotti tarttuu kappaleeseen, avaa pakan ja siirtää kappaleen seuraavaan vapaaseen paikkaan poistolavalla. Tämä ohjelmasykli toistetaan, kunnes viimeinenkin kappale on mitattu, jonka jälkeen robotti siirtyy kotiasemaansa odottamaan.

4.7 Testierä

Robotin ohjelmoinnin jälkeen ajettiin testiajoja työkappaleilla. Ensin ajettiin useampia viiden kappaleen kokoisia eriä, joissa ei ilmennyt ongelmia. Tämän jälkeen siirryttiin pidempiin, 18 kappaleen kokoisiin eriin. Pidemmässä ohjelmakierrossa esiintyi ongelma mitattujen kappaleiden asettamisessa tyhjälle lavalle. Toisen rivin alkaessa robotti yritti lähestyä 11. kappaleen sijaintia lavan alapuolelta. Ongelma aiheutui palletointiohjelman yhden määrittämyspisteen kääntymisestä väärinpäin. Piste sijaitsi edelleen asetetussa paikassa, mutta sen orientaatio oli kääntynyt niin, että positiivinen Z-akseli osoitti ylöspäin. Robotin yrittäessä linjata työkalun Z-akselia pisteen sijainnin mukaan, kääntyi työkalun lähestymissuunta väärinpäin. Ongelma korjaantui asettamalla palletointiohjelman nurkkapisteet uudestaan. Tämän jälkeen ajettiin vielä uusi 18 työkappaleen testierä jonka aikana ei ilmennyt ongelmia.

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tilaajana toimi Mectalent Oy. Tarkoituksena oli ottaa selvää yhteistyöroboteihin liittyvistä turvallisuustoimenpiteistä ja luoda turvallisuusselvitys mittakoneen ja robotin yhteistoiminnalle. Tässä turvallisuusselvityksessä käydään läpi mahdolliset robottiin sekä robottisoluun liittyvät riskit ja riskien pienentämiseen vaadittavat toimet. Turvallisuusselvityksen jälkeen robotti käyttöön otettiin mittakoneen yhteyteen. Robotti saatiin tuotantokäyttöön syöttämään kappaleita mittakoneelle. Robotti kykenee itsenäisesti mittaamaan kappaleita yhden työvuoron ajan, jonka jälkeen työkappaleita sisältävät lavat tulee vaihtaa.

Työ onnistui hyvin, mutta aikataulu venyi työn aikana noin viikolla. Tämä johtui mittakoneen automatisointiin tarvittavien komponenttien tilaamisen viivästyisestä, jonka seurauksena työn lopullinen käytännön osuus saatiin aloitettua noin viikko myöhässä. Työ oli laajuutensa puolesta vaativa ja sisälsi useita osa-alueita. Haastavimpana osiona työssä oli tietynlaisessa työtehtävässä tarvittavien turvallisuustoimien linjaaminen, sillä asiaan ei ole olemassa selkeää ja yksiselitteistä vastausta. Siksi työssä onkin listattu useita erilaisia riskejä ja keinoja niiden poistamiseksi sekä annettu esimerkki mittakoneen ja robotin yhteistyöhön liittyvästä turvallisuusselvityksestä. Tätä pohjaa voidaan käyttää hyödyksi tulevissa turvallisuusselvityksissä siirrettäessä robotti uuteen tehtävään ja sen sisältöä voidaan muokata tarpeen mukaan kyseiseen tehtävään soveltuvaksi. Tarkoitus on jatkossa laajentaa robotin toimintaa muun muassa syöttämällä mittakoneelle muita tuotannosta valmistuvia työkappaleita. Robotin ohjelmaa on jatkossa helppo muokata muille työkappaleille soveltuvaksi, sillä ohjelman runko tulee olemaan kaikkien työkappaleiden syöttämisessä samanlainen.

LÄHTEET

1. Shea, Roberta Nelson 2020. How to automate safely: Cobots & the ISO TS 15066 - Scandinavia. Copenhagen: Universal-robots. Webinaari. Saatu käyttöön lehtori Juha Junttilalta Oulun ammattikorkeakoulusta vuonna 2020.
2. SFS-EN ISO 10218-2. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
3. SFS-EN ISO 12100. 2010. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
4. ISO/TS 15066. 2016. Robots and robotic devices -- Collaborative robots. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
5. Universal Robots e-Series User Manual. 2009-2020. UR10e Original instructions (en). Universal Robots A/S. Saatavissa: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/77195/99405_UR10e_User_Manual_en_Global.pdf. Hakupäivä 27.10.2020.
6. Robotiq EPick Vacuum Gripper for e-Series Universal Robots. 2020. Instruction Manual. Robotiq Inc. Saatavissa: https://assets.robotiq.com/website-assets/support_documents/document/EPick_Instruction_Manual_e-Series_PDF_20200420.pdf?_ga=2.253221002.2094444989.1607350475-1629122358.1604412097. Hakupäivä 7.12.2020.

Robotin ja mittakoneen yhteistoiminnan turvallisuusselvitys

Riskin tyyppi	Havaitut riski	Riskin vakavuuden arviointi	Riskin esiintymistodennäköisyyden arviointi	Toimet riskin pienentämiseksi sallitulle tasolle
Robottiin liittyvät riskit				
Transienttinen kontakti robotin varren ja ihmisen välillä	<ul style="list-style-type: none"> • Robotti tönäisee työntekijää • Robotti kaataa työntekijän 	Lievä (keho) / Vaikea (pään alue)	Epätodennäköinen	Transienttiset kontaktit pyritään poistamaan robottisolun sijoittelun kautta niin, ettei robotin varsi yllä tilassa sijaitseville kulkuväylille. Operaattorin ei myöskään tarvitse mennä robotin vaara-alueelle robotin toiminnan aikana. Transienttisten kontaktien vakavuutta pienennetään myös rajoittamalla robotin voima sekä nopeus hyväksyttävälle tasolle. Laskennallinen maksimi nopeus robotille oli 400mm/s. Robotin nopeus ei kuitenkaan ylitä 250mm/s arvoa missään vaiheessa ohjelmakiertoa. Tämän lisäksi riskiä pyritään pienentämään operaattorin ohjeistuksella.
Kvasistaattinen kontakti robotin varren ja ihmisen välillä	Työntekijä puristuu robotin varsien väliin	Lievä (keho) / Vaikea (pään alue)	Epätodennäköinen	Kvasistaattiset kontaktit pyritään poistamaan robottisolun sijoittelun kautta niin, ettei operaattorilla ole mahdollista joutua robotin varsien väliin. Tämän lisäksi kvasistaattisen kontaktin vakavuutta pyritään pienentämään rajoittamalla robotin voima sekä teho hyväksyttävälle tasolle. Laskennallinen maksimivoima niihin kvasistaattisiin kontakteihin, joita robotin toiminnan yhteydessä voi esiintyä, on 140N. Tämä voima on syötetty maksimivoimaksi robotin turva-asetuksiin. Riskiä on myös pyritty pienentämään ohjeistamalla operaattoreita.
Robotin varren liikenopeus	Odottamattomat nopeat liikkeet, joita työntekijä ei kykene varomaan	Lievä (keho) / Vaikea (pään alue)	Epätodennäköinen	Robotin nopeita liikkeitä pyritään robotin liikenopeutta säätämällä saattamaan sellaiselle tasolle, että liikkeet ovat ennalta arvattavissa ja operaattorilla on mahdollisuus väistyä robotin liikkeen edestä.
Robotin varren voima	<ul style="list-style-type: none"> • Transienttinen kontakti on liian voimakas • Kvasistaattinen kontakti on liian voimakas 	Lievä (keho) / Vaikea (pään alue)	Epätodennäköinen	Robotin voima ja teho rajoitetaan Universal Robotsin turvaparametreilla sellaiselle tasolle, jossa robotin varsi ei kykene esimerkiksi horjuttamaan robotin tiellä seisovaa operaattoria. Tämä rajoitus tulee robotin kvasistaattisten ja transienttisten kontaktien poistamisen yhteydessä.
Robottisoluun liittyvät riskit				
Robotin työkalun aiheuttamat riskit	<ul style="list-style-type: none"> • Työntekijä kehonosan (esim. Sormien) puristuminen tarttujan leukojen väliin • Työntekijän kehonosan jääminen kiinni alipainetarttujaan 	Lievä	Epätodennäköinen	Robottiin liitetyn tarttujan puristusvoima, nopeus ja leukojen aukeaminen säädetään robotin ohjelmassa sellaiselle tasolle, että esimerkiksi operaattorin sormen puristuksiin on epätodennäköistä, eikä se tapahtuessaan aiheuta vakavaa vahinkoa. Mikäli robotin työkaluksi liitetään esimerkiksi alipainetarttuja, tulee tarttujaan liittyvät riskit arvioida, ja varmistaa ettei tarttuja aiheuta käyttäjälle vaaraa.
Robotin työkalun aiheuttamat riskit	<ul style="list-style-type: none"> • Työkappaleen kvasistaattiset ja transienttiset kontaktit työntekijän kanssa • Työkappaleen terävän kulman viiltäminen 	Lievä (keho) / Vaikea (pään alue)	Epätodennäköinen	Robotin tarttujassa olevan työkalun aiheuttamat transienttiset ja kvasistaattiset riskit on huomioitu robottisolun transienttisten ja kvasistaattisten riskien poistamisessa. Nämä arvot säädetään niin, että ne soveltuvat robotin käsittelemille kappaleille.

Työkalun ja työkappaleen välisen tartunnan riskit	<ul style="list-style-type: none"> • Heikko tartunta, jonka seurauksena kappaleen menettäminen • Epäonnistunut työkierto kappaleen virheasennon seurauksena 	Lievä	Epätodennäköinen	Esimerksi työkappaleen virheasennosta johtuva työkalun huono tartunta työkappaleeseen huomioidaan robotin ohjelmassa. Ohjelman liikkeet suunnitellaan niin, etteivät liikenopeudet ja -suunnat lisää riskiä kappaleen menettämiseen (inertia). Tartunta varmistetaan myös ohjelmassa ennen liikkeiden aloittamista. Ennen tarttujen käyttöönottamista tulee myös varmistaa, ettei hätä-seis-painikkeen painaminen aiheuta työkappaleen menettämistä vaarallisella tavalla.
Robottisolun kvasistaattiset riskit	<ul style="list-style-type: none"> • Robotin varren ja kiinteän objektin väliin puristuminen • Robotin työkalun ja kiinteän objektin väliin puristuminen 	Lievä (keho) / Vaikea (pään alue)	Epätodennäköinen	Robottisolun kvasistaattisten kontaktien riskeihin liittyy työntekijän puristuminen robotin ja jonkin kiinteän asian, kuten työkoneen väliin. Robotin varren lisäksi on huomioitava työkalun ja työkappaleen kvasistaattiset riskit. Työkalu ja työkappale kasvattavat robotin varren ulottuvutta ja voivat sisältää teräviä kohtia, joihin muodostuu painepiikkejä. Tämä tulee huomioida robottisolun kvasistaattisten riskien arvioinnissa, kun maksimivoimaa säädetään hyväksytylle tasolle. Robottisolun kvasistaattisten riskien poistaminen on otettu huomioon robotin varren kvasistaattisten riskien poistamisessa määritetyissä arvoissa.
Robottisolun transienttiset riskit	Työkappaleen, tarttujan tai robotin varren varren ja työntekijän välinen transienttinen kontakti	Lievä (keho) / Vaikea (pään alue)	Epätodennäköinen	Robottisolun transienttisiä kontakteja ovat esimerkiksi robotin, työkappaleen tai tarttujan osuminen robotin vaara-alueella sijaitsevaan työntekijään. Työkappale ja tarttuja kasvattavat robotin ulottumaa ja voivat sisältää teräviä kulumia. Robottisolun transienttiset kontaktit on otettu huomioon robotin transienttisiä riskejä poistaessa.
Robotin ohjauslaitteiden sijainti ja ergonomia	<ul style="list-style-type: none"> • Robotin ohjelman aloittaminen turvallisesta paikasta • Robotin ohjelman pysäyttäminen ja jatkaminen robotin vaara-alueella toimimisen ajaksi • Hätäseis-painikkeen saatavuus 	Lievä	Epätodennäköinen	Robotin oma ohjauspaneeli sijoitetaan robotin juureen, robotin jalustalle. Robottiin tullaan kuitenkin liittämään ulkoinen ohjauslaite, jossa on painikkeet ohjelmien käynnistämiseksi ja pysäyttämiseksi sekä hätä-seis-painike. Tämä painikekotelo tullaan sijoittamaan robotin vaara-alueen ulkopuolelle näkyvään paikkaan. Operaattorilla on näin mahdollisuus yletää hätä-seis-painikkeeseen robotin vaara-alueen ulkopuolella sekä robotin varren vieressä. Ulkoinen ohjauspainike mahdollistaa myös robotin turvallisen käynnistämisen ja pysäyttämisen, jos operaattorilla on tarve esimerkiksi käyttää mittakoneen ohjaimia robotin ohjelman ollessa kesken.
Muiden robottisolun kuuluvien työkoneiden aiheuttamat riskit	Mittakoneen virheliikkeen seurauksena törmäminen robottiin	Lievä	Epätodennäköinen	Robottisolun yhteydessä toimii Zeissin valmistama mittakone. Mittakone toimii automatisoidusti ja mittakoneen liikkeet suoritetaan pienellä voimalla. Mittakone ei siis aiheuta robottisolun ympärillä työskenteleville ihmisille olennaista vaaraa, mutta voi aiheuttaa työkierron keskeytymisen, mikäli mittakone törmää robottiin esimerkiksi ohjelmavirheen takia.

Epäergonomisen suunnittelun aiheuttamat haitat	<ul style="list-style-type: none"> • Työkappaleita sisältävien lavojen vaikea lastaaminen ja poistaminen • Työntekijä kulkeminen robotin vaara-alueen läpi epäergonomisen tilankäytön seurauksena 	Lievä	Epätodennäköinen	<p>Käytön kannalta epäergonominen robottisolun suunnittelu voi osoittautua riskiksi työntekijöiden kiertäessä turvallisuuden kannalta olennaisia ratkaisuja, jotka vaikeuttavat tai hidastavat työntekoa. Tämä riski pyritään poistamaan suunnittelemalla robottisolun layout ja toiminta yhdessä tilassa työskentelevien ihmisten kanssa. Operaattorin työskentelemistä robotin ympärillä tullaan helpottamaan myös lattiamerkinöiden, sekä ohjeistuksen kautta.</p>
Robottisolun virhetoiminnan aiheuttamat taloudelliset riskit	<ul style="list-style-type: none"> • Robotin törmäminen mittakoneeseen • Robotin virheen seurauksena työkappaleen vioittuminen 	Lievä	Epätodennäköinen	<p>Robotin liikkeet on luotu niin, ettei se pääse osumaan mittakoneeseen. Mittakoneen mittauspään asemointi kappaleen vaihtamisen kannalta turvalliseen paikkaan on myös varmistettu anturoinnin avulla. Robotilla on anturoinnin ja odotusajan kautta lupa liikkua kappaleen vaihtamiseksi vain, kun mittakone on ajettu turvalliseen paikkaan, jolloin esimerkiksi mittakoneen ja robotin väliset törmäykset ovat erittäin epätodennäköisiä.</p>
Riskien yhdistelmät	<ul style="list-style-type: none"> • Robotin käynnistäminen niin, ettei tilassa oleva toinen työntekijä osaa odottaa käynnistystä • Turvalaitteiden vikaantuminen • Useiden virhetilanteiden riskit 	Lievä	Epätodennäköinen	<p>Mittaustilassa työskentelee useita ihmisiä, jolloin robotin käynnistäminen odottamattomasti jonkun operaattorin toimesta voi aiheuttaa odottamattomia tilanteita. Tämä pyritään poistamaan operaattorien oman koordinoinnin kautta. Robotin turvalaitteet, kuten hätä-seis-painikkeet ja anturoinnit on lisäksi tehty vikaantuneita silmällä pitäen niin, ettei kyseisen komponentin vikaantuminen aiheuta riskiä. Hätä-seis-painikkeen vikaantuminen saa aikaan robotin pysähtymisen ja anturin vikaantuessa robotti ei saa lupaa jatkaa ohjelmakiertoaan.</p>

				<p>Mittakoneen automatisoimiseksi mittakoneeseen on liitetty paineilmatoinen leukapakka. Pakka toimii suurilla puristusvoimilla ja voi aiheuttaa vaikeita vammoja esimerkiksi operaattorin sormien jäädessä pakan leukojen väliin. Operaattorin sormien jääminen puristuksiin on kuitenkin epätodennäköistä. Pakka sijaitsee syvällä robotin työalueella, jonne pääseminen on estetty robottisolun sijoittelun kautta. Tämän lisäksi robotin vaara-alueen reunat on merkitty ja operaattoreita ohjeistettu toiminnan kannalta. Pakka myös suljetaan vain kappaleen ollessa paikallaan pakan leukojen välissä. Pakkaa avataan kappaleiden vaihdon ajaksi vain hieman, jolloin sormienkaan mahtuminen kappaleen ja leukojen väliin ei ole mahdollista.</p>	
Paineilmatoimisen leukapakan riskit	<ul style="list-style-type: none"> • Operaattorin kehonosan (esim. Sormien) puristuminen leukojen väliin • Esim. vikaantumisesta johtuva työkierron epäonnistuminen 	Vaikea	Epätodennäköinen		
Paineilmajärjestelmän riskit	<ul style="list-style-type: none"> •Paineen menettäminen ja työkierron epäonnistuminen •Paineen turvallinen poistaminen järjestelmästä 	Lievä	Epätodennäköinen	<p>Paineilmajärjestelmä sijoitetaan niin, ettei operaattorilla ole mahdollisuutta kompastua paineimaletkuihin, eivätkä paineilman säätökomponentit pääse helposti vaurioitumaan. Paineilmajärjestelmään liittyvät riskit ovat tämän jälkeen lähinnä komponenttien vioittumisiin liittyviä riskejä. Tämä itsessään ei aiheuta tilassa työskenteleville ihmisille riskejä, mutta voi haitata robottisolun toimintaa. Paineilmajärjestelmän paine voidaan lisäksi sulkea sulkuventtiilistä, jonka jälkeen paine voidaan turvallisesti poistaa toisen sulkuventtiiliin kautta.</p>	
Sähkökytkentöihin liittyvät riskit	<ul style="list-style-type: none"> • Virheelliset kytkennät (oikosulku, ylijännite) • Virheellinen sähkökontaktien eristäminen 	Lievä	Epätodennäköinen	<p>Sähkökytkennät robotin ohjauspainikkeille, anturille sekä paineilman ohjaamiselle tehdään ergonomisesti sekä tarvittavien vedonpoistojen kanssa. Näin pienennetään riskiä muun muassa operaattorin sähköjohtoon kompastumiseen sekä sähkökytkentöjen vioittumiseen. Sähkökytkennät tehdään myös öljynkestävällä kaapelilla ja avoimet kytkennät koteloidaan. Tällä varmistetaan sähköjärjestelmän soveltuvuus myös työkonoiden panostamistehtäviin tuotannossa. Sähköjärjestelmä on myös ylikuorma- ja oikosulkusuojattu ja kytkennät on tehty releiden kautta robotin sähköjärjestelmän kuormituksen pienentämiseksi.</p>	
Robottisolun sijoittelun toistettavuus	Turvallisuustoimien muuttuminen robottisolun komponenttien sijainnin muuttuessa	Lievä	Epätodennäköinen	<p>Mittakoneen viereen pultattiin lattiakiinnikkeet robotin sijoittelua varten. Robotti voidaan jatkossa helposti sijoittaa samalle paikalla kiinnittämällä se telineisiin. Tämä helpottaa robotin siirtämistä ja varmistaa, että robotti on samalla paikalla, jolloin aikaisempaa turvallisuusselvitystä voidaan käyttää hyödyksi. Lattiakiinnikkeet myös varmistavat ettei robotti pääse liikkumaan työkierron aikana.</p>	
Sovelluskohtaiset riskit	Henkilökohtaisten suojavarusteiden aiheuttamat rajoitukset	Kuulosuojauksen tms. Aikaansaava robotin toiminnan havaitsemisen vaikeuttaminen	Lievä	Epätodennäköinen	<p>Henkilökohtaiset suojavarusteet, kuten kuulosuojaimet voivat estää operaattoria kuulemasta robotin liikkeitä. Tämä ei kuitenkaan olennaisesti lisää robotin aiheuttamaa riskiä operaattorille. Robotin ja operaattorin välisen kontaktin riskit on jo otettu huomioon riittäväällä tavalla tämän turvallisuusselvityksen aiemmissa kohdissa.</p>
	Nimikylttien, korujen yms roikkuvien esineiden aiheuttamat vaarat	<ul style="list-style-type: none"> • Roikkuvien nimikylttien, löysien vaatteiden, hiuksien, korujen tms. Tarttuminen robottiin 	Keskivaikaa	Epätodennäköinen	<p>Esimerkiksi kaulassa roikkuvat nimikyltit ja korut voivat tarttua robottiin tai sen kuljettamiin työkappaleisiin työkierron aikana. Tämä riski tulee ottaa huomioon niillä ihmisillä, jotka työskentelevät robotin läheisyydessä. Nimikyltit, roikkuvat korut tms. tulee poistaa näiltä henkilöiltä. Tämä riski hoidetaan tiedottamalla asiasta robotin läheisyydessä työskenteleville ihmisille.</p>