

Mathias Mikkonen

# NIVELPUOMIKEVENTIMEN TURVALLI- SUUDEN SUUNNITTELU

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Asko Ellman  
Ilari Laine  
Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Mathias Mikkonen: Nivelpuomikeventimen turvallisuuden suunnittelu  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan DI-ohjelma  
Toukokuu 2022

---

Nostolaitteiden tarkoituksena on helpottaa raskaiden taakkojen käsittelyä ja siten vähentää fyysisestä rasituksesta aiheutuvia työperäisiä sairauksia. Nivelpuomikeventimessä on nivelletty puomi ja tarttuja, joiden avulla voidaan siirtää kappaleita koneen työalueen sisällä. Nivelletty puomi mahdollistaa kappaleiden nostamisen myös paikkoihin, joihin perinteisillä ylhäältä päin laskevilla nostureilla ei päästä. Koneita voidaan käyttää esimerkiksi erilaisten työstö- tai mittauskoneiden yhteydessä työkappaleiden käsittelyyn. Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää nivelpuomikevennintä koskevat turvallisuusvaatimukset ja suunnitella koneesta uusi versio näiden vaatimusten mukaiseksi.

Työn alussa selvitetään kirjallisuuskatsauksen avulla konedirektiivin vaikutusta turvallisen koneen suunnitteluun. Konedirektiivin lisäksi tutustutaan standardeihin, joita voidaan hyödyntää suunnittelussa. Standardeja seuraamalla varmistutaan, että tehtävät ratkaisut täyttävät konedirektiivin asettamat oleelliset terveys- ja turvallisuusvaatimukset.

Käyttäjän työssään kohtaamia vaaroja ja niihin liittyviä riskejä selvitetään riskin arvioinnin avulla. Konedirektiivi asettaa lähtökohdat riskin arviointiin määrittelemällä käytettävän toimintatavan. Tässä työssä riskin arviointi suoritetaan ISO 12100 -standardin mukaisesti. Vaarojen tunnistamiseen hyödynnetään useita eri lähteitä. Tapaturmaraporteista tutkitaan aiempia nostureilla ja nostolaitteilla sattuneita onnettomuuksia. Standardien listat merkittävistä vaaroista ovat keskeisiä lähteitä vaarojen tunnistamiseen. Näiden lisäksi tunnistetaan loput vaarat tutkimalla käyttäjien työtehtäviä koneen elinkaaren eri vaiheissa. Vaaroja aiheuttaa myös koneen väärinkäyttö, joka huomioidaan riskin arvioinnissa.

Lopuksi selvitetään, millaisilla suunnitteluratkaisuilla koneen käyttöön liittyviä riskejä voidaan pienentää. Riskien pienentämiseen käytetään konedirektiivissä määritettyä kolmen askeleen menetelmää. Ensimmäisen askeleen tavoitteena on poistaa vaaroja tai pienentää niihin liittyviä riskejä suunnitteluratkaisujen avulla. Esimerkiksi tarttujan paineilmasylinteriin liittyvä puristumisvaara saadaan poistettua koneesta kokonaan. Mikäli riski ei ole riittävän pieni ensimmäisten toimenpiteiden jälkeen, hyödynnetään suojuksia ja ohjausjärjestelmän turvatoimintoja. Työssä esitetään kappaleen pudottamisen estävän turvatoiminnon suunnittelu. Turvatoiminnon ansiosta käyttäjä ei voi pudottaa nostamaansa kappaletta kesken noston.

Suunnitteluvaiheen lopuksi arvioidaan koneeseen liittyvät riskit uudelleen ja listataan koneen jäännösriskit. Jäännösriskien ja muiden tarvittavien tietojen pohjalta luodaan tarvittavat käyttö- ja huolto-ohjeet koneen mukana toimitettavaksi. Ohjeiden lisäksi esitellään myös muut konedirektiivin vaatimukset CE-merkityn koneen markkinoille saattamiseksi.

Avainsanat: nivelpuomikevennin, nostolaite, koneturvallisuus, turvallisuus, suunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Mathias Mikkonen: Safety engineering for a manipulator  
Master of Science Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Program in Mechanical Engineering  
May 2022

---

The purpose of hoisting machines is to make lifting heavy loads easier and therefore to lower the physical stress caused to workers. The manipulator in this thesis has an articulated boom and a gripper. With the use of these elements, it is possible to move objects within the machine's working area. Articulated boom enables lifting objects to places where regular hoisting machines could not reach. The manipulator can be used for example with different kinds of milling or measuring machines to handle workpieces. The purpose of this thesis is to find out safety regulations for hand-guided manipulators and to design a new version of the machine which fulfills requirements.

At the beginning of this thesis there are results from a literary survey to describe how machinery directive affects to designing a safe machine. In addition to machinery directive, several standards are studied to find help for the designing phase. By following standards, it is possible to ensure that all design decisions fulfill health and safety requirements from the machinery directive.

Risk assessment is carried out to find out hazards and evaluate risks that are countered by the operator. Machinery directive sets the basic guidelines for risk assessment. ISO 12100 standard is followed to make risk assessment for the designed manipulator. Multiple sources are utilized to identify all hazards relating to the designed manipulator. Accident reports are used to find out common design mistakes from other machines. Hazard lists from standards are the most important source for hazard identification. In addition to these sources, the rest of the hazards are identified by examining tasks related to using the machine. Also, misuse of the machine is taken into account during risk assessment.

Finally, it is examined what kind of design solutions will eliminate hazards or reduce risks. Risk-reducing is done according to the principle of three steps from the machinery directive. Goal of the first step is to eliminate hazards or reduce risks by design measures. For example, compression risk related to gripper mechanism is eliminated from the machine. If a risk is not acceptable after the first step, guards and safety functions are used. Design of a safety function for preventing a user from dropping the lifted load is described in this thesis. Because of the safety function, the user is not able to drop the lifted load during operation.

At the end of the design process, risks related to the manipulator are evaluated again and residual risks are listed. User and service manuals are written based on residual risks and other relevant information. In addition to manuals, other requirements from the machinery directive for CE marking are presented.

Keywords: manipulator, hoisting machine, machine safety, safety, engineering

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tahdon kiittää Metecno Oy:tä ja Matti Metsähonkalaa mielenkiintoisesta aiheesta diplomityöhön. Työn aihe antoi mahdollisuuden oppia paljon uutta koneturvallisuudesta ja koneiden suunnittelusta. Kiitokset Mika Saloselle opastuksesta ja avusta suunnitteluprosessin aikana. Kiitokset professori Asko Ellmanille diplomityön ohjaamisesta. Kiitos Emmalle työn oikoluvusta ja kannustuksesta työn kirjoittamisen aikana. Kiitokset vanhemmille läpi opiskelutaipaleen jatkuneesta tuesta.

Tampereella, 3.5.2022

Mathias Mikkonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuskysymykset ja -menetelmät.....	2
2. NIVELPUOMIKEVENNIN.....	4
2.1 Aiempi versio .....	4
2.2 Työturvallisuus ja suunnittelua tukevaa tietoa työtapaturmista .....	5
3. KONEDIREKTIIVIN JA STANDARDIEN ASETTAMAT VAATIMUKSET .....	8
3.1 Konedirektiivi (koneasetus) .....	8
3.2 Standardit .....	11
3.2.1 Käsin ohjattavat kuorman käsittelylaitteet .....	12
3.2.2 Ohjausjärjestelmien suunnitteluperiaatteet.....	14
3.2.3 Muut suunnittelussa huomioitavat standardit.....	20
4. RISKIN ARVIOINTI .....	22
4.1 Periaatteita.....	22
4.2 Riskin arvioinnin työkaluja .....	26
4.2.1 Riskigraafi.....	27
4.2.2 Riskimatriisi.....	29
4.2.3 Numeerinen pisteytys .....	30
4.2.4 HRN (Hazard Rating Number) .....	31
4.3 Nivelpuomikeventimen riskien arviointi.....	34
4.3.1 Koneen raja-arvot .....	34
4.3.2 Vaarojen tunnistaminen ja riskien suuruuden arviointi.....	36
4.3.3 Jäännösriskit.....	38
5. SUUNNITTELURATKAISUT .....	40
5.1 Riskien pienentäminen.....	40
5.2 Tarttujan (kuormanpitolaite) turvallisuus.....	43
5.3 Puristamisen estäminen .....	49
5.4 Koneen nostaminen ja kiinnittäminen .....	50
5.5 Ohjausjärjestelmän turvaominaisuudet.....	54
5.6 Turvallisuusratkaisujen todentaminen .....	58
6. MARKKINOILLE SAATTAMINEN .....	62
7. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT .....	66
LÄHTEET .....	68

# KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Tutkimusongelman muodostuminen ja ratkaisu.</i>	2
<i>Kuva 2. Nivelpuomikevennin NPK-30-1600 (Metecno, 2022a).</i>	4
<i>Kuva 3. Kappaleen nostaminen reikiä hyödyntämällä (Metecno, 2020).</i>	5
<i>Kuva 4. Turvatoiminnon yleinen rakenne perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 23).</i>	17
<i>Kuva 5. Luokkien yhteys saavutettavaan suoritustasoon (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 28).</i>	18
<i>Kuva 6. Riskien arviointi -prosessi perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 15).</i>	23
<i>Kuva 7. Vaarojen tunnistamisen työkalu perustuen lähteeseen (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 14).</i>	24
<i>Kuva 8. Riskigraafi perustuen lähteeseen (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 30).</i>	27
<i>Kuva 9. Vaaditun suoritustason <math>PL_r</math> määrittäminen riskigraafin avulla perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 55).</i>	28
<i>Kuva 10. Riskien arviointi 3x3 matriisilla (Siirilä, 2016, s. 224).</i>	29
<i>Kuva 11. Nivelpuomikeventimen vaaravyöhykkeet.</i>	35
<i>Kuva 12. Riskien pienentämisen periaate perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 16).</i>	40
<i>Kuva 13. Nivelpuomikeventimen tarttuja.</i>	44
<i>Kuva 14. Tartunnan vapaakappalekuva.</i>	44
<i>Kuva 15. Tarttujan kiilan vapaakappalekuva.</i>	46
<i>Kuva 16. Koneen käyttöpaikka.</i>	49
<i>Kuva 17. Puomin nostoliikkeen toteutus.</i>	50
<i>Kuva 18. Lujuuslaskennan tulokset kattopellille 4 mm ohutlevystä.</i>	51
<i>Kuva 19. Lujuuslaskennan tulokset kattopellille 6 mm ohutlevystä.</i>	52
<i>Kuva 20. Lattiaan kiinnityksen vapaakappalekuva.</i>	53
<i>Kuva 21. Kolmannen nivelen rakenne ja anturointi.</i>	55
<i>Kuva 22. 3d-malli suunnitellusta koneesta.</i>	59

# TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Suoritustasojen määritelmät (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 19).....</i>	<i>15</i>
<i>Taulukko 2. Kanavan MTTFD luokittelu perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 25).....</i>	<i>18</i>
<i>Taulukko 3. Numeerisen pisteytyksen määräytyminen (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 32).....</i>	<i>31</i>
<i>Taulukko 4. HRN-arvon merkitys (Metecno, 2022b).....</i>	<i>32</i>
<i>Taulukko 5. Riskin esiintymistodennäköisyys (Metecno, 2022b).....</i>	<i>32</i>
<i>Taulukko 6. Vaaralle altistumisen kesto (Metecno, 2022b).....</i>	<i>33</i>
<i>Taulukko 7. Mahdollisen vamman vakavuusluokka (Metecno, 2022b).....</i>	<i>33</i>
<i>Taulukko 8. Vaaralle altistuvien henkilöiden määrä (Metecno, 2022b).....</i>	<i>33</i>
<i>Taulukko 9. Mahdollisesti esiintyvät onnettomuustilanteet.....</i>	<i>36</i>
<i>Taulukko 10. Vaaroihin liittyvät olosuhteet.....</i>	<i>37</i>
<i>Taulukko 11. Riskien suuruuden arviointi.....</i>	<i>37</i>
<i>Taulukko 12. Alustavan riskien arvioinnin tulokset.....</i>	<i>38</i>
<i>Taulukko 13. Koneen lopullinen riskien arviointi ja jäännösriskit.....</i>	<i>39</i>
<i>Taulukko 14. Turvatoimintojen komponenttien arvoja.....</i>	<i>55</i>

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CCF	engl. common cause failure, yhteisvikaantuminen
CH	engl. channel, turvatoiminnon kanava
CE	ransk. Conformité Européenne, eurooppalainen vaatimustenmukaisuus
FEM	engl. finite element method, elementtimenetelmä
HRN	engl. hazard rating number, numeeriseen pisteytykseen perustuva riskin arvioinnin työkalu
ISO	kansainvälinen standardoimisjärjestö
IFA	saksalainen työsuojelun tutkimuslaitos
METSTA	metalliteollisuuden standardisointiyhdistys ry
NPK	nivelpuomikevennin
NC	engl. normally closed, avautuva kosketin
PLC	engl. programmable logic controller, ohjelmoitava logiikka
SF	engl. safety function, ohjausjärjestelmän turvatoiminto
SFS	Suomen standardoimisliitto
SISTEMA	IFA:n kehittämä ohjelmisto turvatoiminnon suunnitteluun
STO	engl. safety torque off, vääntömomentin turvallinen poisto moottorilta
WLL	engl. working load limit, nostolaitteen suurin sallittu kuorma
<i>a</i>	kiihtyvyyys
A	engl. possibility of avoidance or reduction of harm, vahingon välttämisen tai rajoittamisen mahdollisuus
A1	vahingon välttämisen tai rajoittamisen mahdollisuuden luokka 1
A2	vahingon välttämisen tai rajoittamisen mahdollisuuden luokka 2
$A_{syl}$	paineilmasyylinterin voimaa tuottava pinta-ala
$B_{10d}$	jaksojen määrä, johon mennessä 10 prosenttia komponenteista on vikaantunut vaarallisesti
bar	paineen yksikkö, 1 bar = $10^5$ Pa
DC	engl. diagnostic coverage, diagnostiikan kattavuus
$DC_{avg}$	keskimääräinen diagnostiikan kattavuus
DPH	engl. degree of possible harm, vahingon vakavuusluokka
F	engl. frequency and/or duration of exposure to hazard, vaaralle altistumisen taajuus ja/tai kesto
F1	vaaralle altistumisen taajuuden ja/tai keston luokka 1
F2	vaaralle altistumisen taajuuden ja/tai keston luokka 2
$F_i$	voima
FE	engl. frequency of exposure, altistumisen kesto
<i>g</i>	putoamiskiihtyvyyys
LO	engl. likelihood of occurrence, esiintymistodennäköisyys
$m_{dynaaminen,min}$	dynaamisessa kokeessa käytettävän kuorman massa
$m_{staattinen,min}$	staattisessa kokeessa käytettävän kuorman massa
MTTF <sub>D</sub>	engl. mean time to dangerous failure, vaarallinen keskimääräinen vikaantumisaika
$n_{kiinnityspisteet}$	kiinnityspisteiden lukumäärä
$n_{op}$	toimintajaksojen määrä vuodessa
$n_{varmuus}$	varmuuskerroin
NP	engl. number of persons at risk, vaaralle altistuvien henkilöiden määrä
O	engl. probability of occurrence of a hazardous event, vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyys
O1	vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyyden luokka 1



O2	vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyyden luokka 2
O3	vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyyden luokka 3
$p_{\text{tartunta}}$	kappaleen nostamiseen tarvittava paine sylinterissä
P	engl. probability, vahingon todennäköisyys
P1	vahingon todennäköisyyden luokka 1
P2	vahingon todennäköisyyden luokka 2
$PFH_D$	engl. average probability of dangerous failure per hour, vaarallisen keskimääräisen vikaantumisaajan todennäköisyys tuntia kohden
$PFH_{D,i}$	tietyn alijärjestelmän tai turvatoiminnon vaarallisen keskimääräisen vikaantumisaajan todennäköisyys tuntia kohden
PL	engl. performance level, suoritustaso
$PL_r$	engl. required performance level, vaadittava suoritustaso
PS	engl. propability score, todennäköisyyden pistemäärä
RS	engl. risk score, riskin pistemäärä
S	engl. severity of the harm, vahingon vakavuus
S1	vahingon vakavuuden luokka 1
S2	vahingon vakavuuden luokka 2
SS	engl. severity score, vakavuuden pistemäärä
$\alpha$	kiilakulma
$\mu$	kitkakerroin

# 1. JOHDANTO

Työn fyysistä kuormittavuutta pyritään yleisesti vähentämään, jotta erilaisten työperäisten sairauksien määrä Suomessa vähenisi ja työntekijöiden viihtyvyys työssään paranisi. Lähteen (Työterveyslaitos, 2022) mukaan tuki- ja liikuntaelämistön sairaudet ja oireet ovat yleisimpiä työterveysongelmia Suomessa. Pelkästään selkäsairaudet aiheuttavat 10 prosenttia yli 10 päivän sairauspoissaoloista. Tavallisimpiin työn kuormitustekijöihin kuuluvat raskaiden taakkojen nostaminen, kantaminen ja työntäminen. (Työterveyslaitos, 2022) Työn kuormittavuutta voidaan vähentää ottamalla käyttöön erilaisia apulaitteita taakkojen nostamiseksi, mutta on tärkeää varmistua, etteivät käytetyt koneet aiheuta uusia riskejä työntekijöiden terveydelle.

Tässä diplomityössä tutkitaan koneiden turvallisuutta ja tutkimuksen keskiössä on Metecno Oy:n valmistama nivelpuomikevennin. Kone on suunniteltu enintään 30 kilogramman painoisten kappaleiden käsittelyyn ja se mahdollistaa kappaleiden viennin koneiden sisälle. Tämän työn tarkoitus on selvittää konetta koskevat turvallisuusvaatimukset ja suunnitella uusi versio koneesta sekä varmistua, että suunnitteluratkaisut täyttävät koneelle asetetut vaatimukset.

Nivelpuomikevennin on laite, joka on tarkoitettu kiinteiden kappaleiden siirtämiseen sen työalueen sisällä. Keventimessä on nivelletty puomi, jonka avulla käyttäjä voi liikuttaa taakkaa vaakasuunnassa. Tämän lisäksi puomia voidaan nostaa ja laskea moottoroidun liikkeen avulla. Lähtökohtana on, että käsiteltävien kappaleiden enimmäismassa uudella keventimellä on 60 kilogrammaa. Käsiteltävät kappaleet eivät voi olla rasvaisia tai erityisen likaisia, koska kuormanpitolaite perustuu kitkavoimaan.

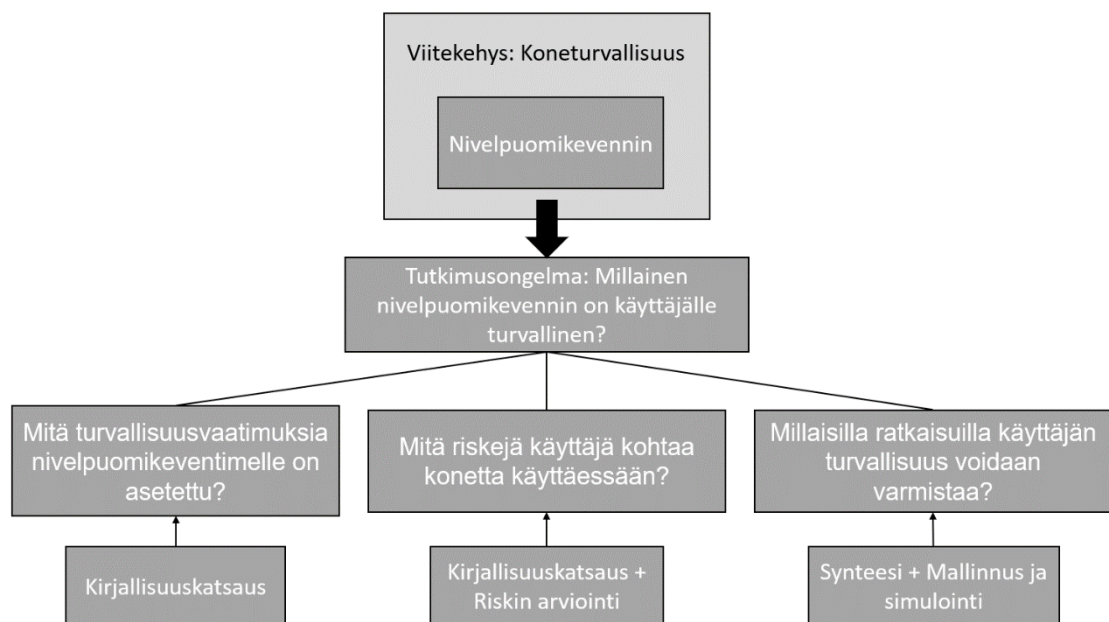
Nostoihin ja nostolaitteisiin liittyy aina riskejä, koska putoavista taakoista aiheutuu käyttäjälle usein vakavia, jopa kuolemaan johtavia tapaturmia. Näiden vaarojen vuoksi on tärkeää kiinnittää erityistä huomiota koneen turvallisuuteen suunnitteluprosessin jokaisessa vaiheessa. Tässä työssä turvallisuus on nostettu suunnitteluprosessin keskeisimmäksi osa-alueeksi.

Tutkimuksen luvussa kaksi esitellään lähtötilannetta ja muilla nostolaitteilla sattuneita tapaturmia. Tämän jälkeen luvussa kolme selvitetään konetta koskevat vaatimukset tur-

vallisuuden suhteen. Näiden lähtötietojen ja vaatimusten perusteella neljännessä luvussa käsitellään riskin arvioinnin periaatteita ja työkaluja. Lopuksi selvitetään käyttäjän työssään kohtaamat riskit. Luvussa viisi esitetään riskien pienentämisen periaatteet ja suunnitteluratkaisut riskien pienentämiseksi. Lisäksi esitetään ratkaisut näiden toimenpiteiden toimivuuden todentamiseen. Luvussa kuusi käsitellään jäännösriskien huomioiminen käyttöohjeissa ja muut vaatimukset, joita koneen on täytettävä ennen markkinoille saattamista.

## 1.1 Tutkimuskysymykset ja -menetelmät

Kuten edellä mainittiin, tämän diplomityön keskiössä on nivelpuomikeventimen suunnittelu. Työn aihetta käsitellään koneturvallisuuden viitekehyksessä. Näistä lähtökohdista voidaan muotoilla työlle tutkimusongelma, joka on tarkoitus ratkaista. Työn tutkimusongelmana (Kuva 1) on selvittää millainen nivelpuomikevennin on käyttäjälle turvallinen. Tutkimusongelman ratkaisemiseksi muodostetaan tutkimusstrategia, joka määrittää toimintatavan ja käytettävät tutkimusmenetelmät ongelman ratkaisemiseksi. Tutkimus toteutetaan käyttämällä konstruktivistista toimintamallia ja tutkimuksessa keskitytään pääasiassa laadulliseen tutkimukseen.



**Kuva 1. Tutkimusongelman muodostuminen ja ratkaisu.**

Asetettu tutkimusongelma ratkaistaan jakamalla se tutkimuskysymyksiin ja ratkaisemalla kukin kysymys erikseen. Ratkaisemalla kaikki tutkimuskysymykset saadaan aikaan kokonaisuus, joka vastaa tutkimusongelmaan. Tämän diplomityön tutkimuskysymyksiä ovat:

- Mitä turvallisuusvaatimuksia nivelpuomikeventimelle on asetettu?
- Mitä riskejä käyttäjä kohtaa konetta käyttäessään?
- Millaisilla ratkaisuilla käyttäjän turvallisuus voidaan varmistaa?

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastataan kirjallisuuskatsauksen avulla. Kirjallisuuskatsauksen avulla pyritään määrittämään vastaavilla koneilla sattuneita tapaturmia sekä asettamaan suunnittelulle vaatimukset, jotka täyttämällä suunnitellusta koneesta tulee vaatimusten mukainen ja ennen kaikkea turvallinen käyttää. Tutkimuskysymyksen vastaukseen kerättyä tietoa hyödynnetään kahden muun tutkimuskysymyksen ratkaisussa.

Riskin arvioinnin on tarkoitus vastata toiseen tutkimuskysymykseen. Työssä selvitetään riskien arvioinnin taustaa ja perusteellisen riskien arvioinnin tekemisen vaatimuksia ja työkaluja. Kirjallisuuskatsauksen tuloksena saadaan tietoja käyttäjän kohtaamista vaaroista. Näiden tietojen pohjalta suoritetaan tutkimuksen koneelle riskin arviointi, jotta saadaan selkeä käsitys käyttäjän kohtaamista riskeistä.

Työn loppupuolella määritetään ratkaisuja, joiden avulla varmistetaan käyttäjän turvallisuus kaikissa tilanteissa. Tässä käytetään lähtötietona riskin arvioinnin tuloksia ja standardien asettamia vaatimuksia, joiden perusteella muodostetaan suunnitteluratkaisuja synteesiä käyttämällä. Mallinnusta ja simulointia käytetään suunnitteluratkaisujen toimivuuden arviointiin.

## 2. NIVELPUOMIKEVENNIN

Nivelpuomikevennin on Metecno Oy:n kehittämä erikoiskone, jota voidaan käyttää kappaleiden tai työkalujen siirtämiseen muille koneille. Tässä luvussa käsitellään koneen nykyistä versiota, joka toimii lähtökohtana tälle tutkimukselle. Lisäksi perehdytään nostureilla ja nostolaitteilla sattuneisiin tapaturmiin. Tapahtuneista tapaturmista on mahdollista kerätä hyödyllistä tietoa, jonka avulla uudesta koneesta voidaan suunnitella turvallisempi ja paremmin toimiva.

### 2.1 Aiempi versio

Nivelpuomikeventimen (Kuva 2) avulla voidaan nostaa ja siirtää kappaleita sen työalueella. Kevennintä voidaan käyttää esimerkiksi työkappaleiden siirtämiseen kuormauslavalta työstökoneeseen. Koneen nostoliike on moottoroitu ja käyttäjä voi ohjata puomin nopeutta portaattomasti ohjaussauvan keinukytkimellä.

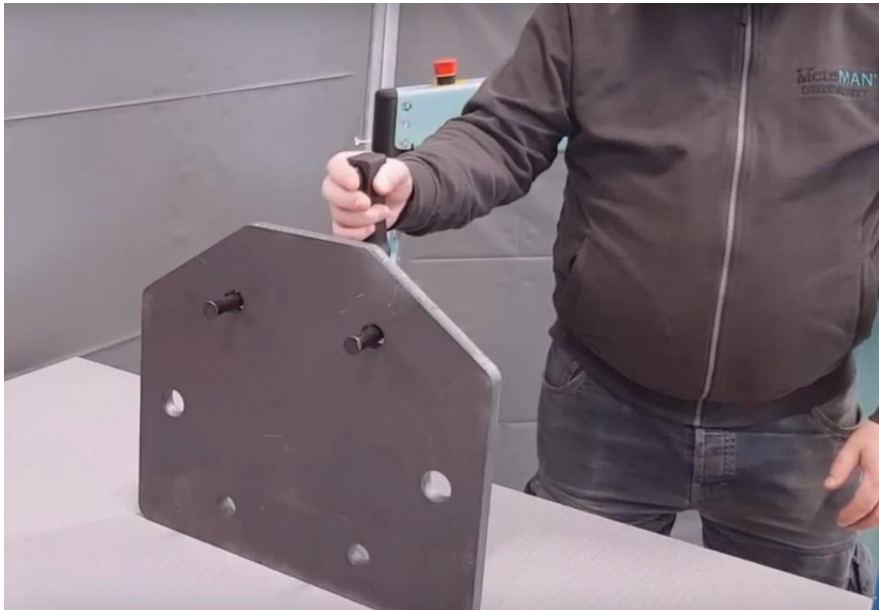


**Kuva 2. Nivelpuomikevennin NPK-30-1600 (Metecno, 2022a).**

Käsittelylaite on kehitetty etenkin tilanteisiin, joissa nostettavaa kappaletta ei voida laskea ylhäältäpäin perinteisellä nosturilla. Useiden työstö-, mitta- tai särmäyskoneiden sisälle pääsy vaatii vaakasuuntaista liikettä. Nivelpuomikeventimen puomi voidaan ajaa oikealle korkeudelle ja tämän jälkeen työntää kappale koneen tai esimerkiksi hyllyn sisälle. Kolmesta kohdasta nivelletty puomi mahdollistaa kappaleen tarkan ohjauksen niin

sijainnin kuin asennonkin puolesta. Koneen käyttö parantaa työergonomiaa, koska työntekijöiden ei tarvitse nostella painavia kappaleita hankaliin paikkoihin koneiden sisälle.

Tässä työssä on tarkoitus suunnitella koneesta uusi versio, jonka on kyettävä käsittelemään enimmillään 60 kilogramman painoisia kappaleita. Lisäksi kappaleita ei ole mahdollista nostaa edellisen version tapaan rei'istä (Kuva 3), vaan koneeseen täytyy suunnitella uudentyyppinen tarttuja. Tavoitteena on myös kasvattaa koneen nostoliikkeen nopeutta. Aiemman version nopeutta rajoitti valittu voimansiirtotapa, joten nostoliikkeen voimansiirtojärjestelmä on suunniteltava uudestaan.



**Kuva 3. Kappaleen nostaminen reikiä hyödyntämällä (Metecno, 2020).**

Keskeisintä tämän tutkimuksen kannalta onkin löytää keinot, joiden avulla koneen turvallisuus pysyy hyvällä tasolla tai jopa paranee, kun koneen suorituskykyä parannetaan. Nostoliikkeen nopeus ja puomin ulottuvuus kasvavat, ja suurin käsiteltävä kuorma suurenee. Aiemmassa versiossa ei ole ilmennyt merkittäviä turvallisuuspuutteita, joita täytyisi huomioida uuden version suunnittelussa. Toisaalta monet edellisen version suunnitteluratkaisut eivät sovellu uuteen koneeseen muuttuneiden vaatimusten vuoksi.

## **2.2 Työturvallisuus ja suunnittelua tukevaa tietoa työtapaturmista**

Työnantajilla on yleinen huolehtimisvelvoite työntekijöiden turvallisuudesta. Turvallisuutta varmistaessaan työnantajan on otettava huomioon työhön, työympäristöön ja työolosuhteisiin liittyvät asiat. Työnantajan on lisäksi tarkkailtava työympäristöä ja varmistettava turvallisista työtavoista. (Työtapaturma- ja ammattitautilaki 2015/459) Koneen

valmistajan on puolestaan kerrottava koneen jäännösriskeistä ja turvallista käyttöä koskevista tiedoista (Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta 2008/400). Nämä vaatimukset asettavat periaatteita koneen suunnitteluun. Käyttöohjeita ja koneen varoituksia laadittaessa on varmistuttava, että käyttäjä sekä käyttäjän työnantaja saavat riittävät tiedot koneesta ja sen toiminnasta. Työnantajan on pystyttävän määrittämään turvalliset työtavat työntekijöilleen koneen mukana tulevan dokumentaation perusteella.

Työnantajan on selvitettävä riittävän järjestelmällisesti työhön ja työympäristöön liittyvät vaarat ja riskit (Työtapaturma- ja ammattitautilaki 2015/459, 10 §). Työnantaja ei siis voi luottaa pelkästään koneen valmistajan suorittamaan riskin arviointiin, vaan on aina arvioitava tapauskohtaisesti työhön liittyvät riskit. Koneen valmistajalla ei myöskään ole riittävän kattavaa käsitystä työympäristöstä, työntekijöistä tai työpaikan työkuultuurista, jotta kaikki niihin liittyvät riskit voitaisiin arvioida koneen suunnitteluvaiheessa. Koneita on pystyttävä käyttämään usean asiakkaan tiloissa, jolloin tiettyyn työympäristöön liittyviä vaaroja ei voida huomioida suunnitteluvaiheessa.

Koneen suunnittelun alkuvaiheessa on hyvä perehtyä kokemuksiin vastaavista koneista. Merkittävää hyötyä voi olla myös erilaisista tapaturmaraporteista. Suomessa tapaturmavakuutuslaitosten liitto julkaisee raportit vakavista eli kuolemaan johtaneista työtapaturmista. Juuri tämänkaltaisia nostolaiteita ei ole juurikaan markkinoilla, mutta erilaisia nostimia ja nostureita käytetään laajalti. Niitä käytettäessä on tapahtunut vuosien varrella useita tapaturmia, joista voidaan varmasti poimia hyödyllisiä oppeja koneen suunnittelun tueksi.

Vuonna 2013 tapahtuneessa tapaturmassa henkilö menehtyi taakan pudotessa hänen päälleen. Yhtenä vaikuttavana tekijänä saattoi olla koneen toimintaperiaate, jonka mukaan siltanosturin liike on hitaampaa liikealueen ääripäissä. (Tapaturmavakuutuslaitosten liitto, 2013, s. 7) Tässä työssä suunniteltavaan koneeseen tulee vastaava toiminnallisuus, jotta voidaan varmistua puomin turvallisesta pysäyttamisestä päätyrajalle. Käyttöohjeissa on huomioitava, että käyttäjä saa tarvitsemansa tiedot koneen toiminnallisuudesta. Kun toiminta päätyrajojen läheisyydessä kuvataan käyttöohjeessa yksityiskohtaisesti, eivät nopeuden rajoituksen muutokset muodosta yllättäviä tilanteita käyttäjälle.

Vuonna 2008 ja 2012 tapahtuneissa tapaturmissa saksinostimen käyttäjä menehtyi virheellisen ohjausliikkeen seurauksena. Molemmissa tapauksissa nostimen ajo ja nostoliikettä ohjattiin samalla ohjaimella. Kuljettajat luulivat ohjaavansa ajoliikettä, kun todellisuudessa he aloittivatkin nostoliikkeen. Käyttäjät puristuivat ylöspäin ja menehtyivät

vammoihinsa. (Tapaturmavakuutuslaitosten liitto, 2012) Raportin kuvista voidaan päätellä, että koneiden ohjauslaitteet olivat puutteellisia. Käyttäjällä ei ollut ohjainten puutteiden vuoksi selkeää käsitystä, miten ohjainten käyttö kussakin tilanteessa vaikuttaa koneen liikkeisiin. Ohjauksen toteuttama liike oli pääteltävissä ainoastaan valintakytkimen asennosta.

Nivelpuomikeventimen puomin päässä olevalla ohjaussauvalla käytetään sekä itse kevennintä että sen mukana toimitettavaa lisälaitetta. Ohjaussauvan suunnittelussa on huomioitava, että käyttäjälle viestitään selkeästi, mitä liikettä kulloinkin ohjataan. Hyvistä ohjaimista huolimatta voidaan olettaa, että jossain vaiheessa koneen käyttöä käyttäjä erehtyy valitusta toimintatavasta. Tämä tilanne on tarkasteltava riskien arvioinnissa ja huomioitava riskien pienentämistoimissa siten että virheelliset käyttötilan valinnat eivät aiheuta vakavia vahinkoja koneen käyttäjälle.



## 3. KONEDIREKTIIVIN JA STANDARDIEN ASETTAMAT VAATIMUKSET

Tässä luvussa esitetään konedirektiivin asettamia vaatimuksia koneiden turvallisuudelle ja standardien suhdetta konedirektiiviin. Lisäksi käsitellään suunnittelussa käytettäviä standardeja ja niiden asettamia vaatimuksia suunnittelulle.

### 3.1 Konedirektiivi (koneasetus)

Koneita koskevat turvallisuusvaatimukset ovat peräisin konedirektiivistä. Konedirektiivi on Euroopan unionin direktiivi, joka on lisätty osaksi Suomen kansallista lainsäädäntöä koneasetuksena. Koneasetus velvoittaa Suomessa toimivia koneenvalmistajia toimimaan konedirektiivin vaatimusten mukaisesti.

Koneeksi luetaan kokonaisuus, joka kattaa seuraavat ehdot:

- Siinä on osia tai komponentteja.
- Siinä on voimansiirtojärjestelmä (muu kuin välitön ihmis- tai eläinvoima) tai se on varusteltavissa voimansiirtojärjestelmällä.
- Ainakin yksi osa tai komponentti liikkuu.
- Se on kokoonpantu erityistä toimintoa varten. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 4)

Konedirektiivi koskee kaikkia sen määritelmän mukaisia koneita. Direktiivi ei erittele myytäviä koneita ja omaan käyttöön valmistettavia koneita. Koneen yleisestä määritelmästä johtuen hyvin yksinkertaisetkin laitteet ovat konedirektiivin määritelmän mukaisia koneita, jolloin niitä koskevat kaikki direktiivin asettamat vaatimukset. Myös koneen dokumentaatiota ja merkintöjä koskevat vaatimukset täytyy huomioida. (Siirilä, 2016, s. 42) Valmistaja on koneen suunnitellut ja/tai valmistanut taho ja on vastuussa koneen vaatimustenmukaisuudesta. Määritelmän mukaisen valmistajan puuttuessa koneen valmistajaksi luetaan koneen markkinoille saattanut tai käyttöönottanut taho. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 5) Tämä on hyvä huomioida työpaikoilla, koska monet itse rakennetut apulaitteet ovat konedirektiivin piirissä. Tällöin ne käyttöönottanut henkilö tai yritys on vastuussa siitä, että ne ovat konedirektiivin vaatimusten mukaisia.

Konedirektiivin viides artikla määrittelee koneiden markkinoille saattamista ja käyttööntamasta. Sen perusteella koneen valmistajan on varmistuttava, että kone täyttää direktiivin liitteessä yksi (1) esitetyt olennaiset turvallisuus- ja terveysvaatimukset. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 6) Liite yksi onkin koneiden valmistajien kannalta hyvin keskeinen, koska se asettaa terveys- ja turvallisuusvaatimuksia suunniteltaville koneille. On hyvä huomata, että konedirektiivin vaatimukset ovat pakottavaa lainsäädäntöä eli valmistaja ei voi jättää vaatimuksia huomioimatta.

Konedirektiivin ensimmäinen liite on jaettu useaan osioon. Näistä ensimmäinen käsittelee yleisiä vaatimuksia, jotka jokaisen konedirektiivin alaisen koneen on täytettävä. Yleisiä vaatimuksia koneiden turvallisuudelle ovat esimerkiksi vaatimus hätäpysäytyslaitteista ja vaatimukset koneen merkinnöille sekä ohjeille (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY).

Konedirektiivissä esitetään yleisten vaatimusten lisäksi myös tietyille konetyypeille tai tiettyihin vaaroihin liittyviä tarkennettuja vaatimuksia. Tämän tutkimuksen kannalta keskeisiä ovat nostoihin liittyvistä vaaroista asetetut vaatimukset. Vaatimuksena on esimerkiksi, että nostolaitteelle on suoritettava staattinen ja dynaaminen koe, minkä lisäksi nostolaitteessa on oltava selvä merkintä suurimmasta sallitusta kuormasta (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY). Nämä ja muut liitteen asettamat vaatimukset tulevat huomioiduksi seuraamalla suunnittelussa konekohtaista C-typin standardia.

Lisäksi liitteessä 1 määritetään esimerkiksi prosessi koneiden riskien arviointiin. Riskien arviointi on luonteeltaan iteratiivinen ja sen avulla määritetään, mitkä terveys- ja turvallisuusvaatimukset koskevat käsiteltävää konetta. Riskien arviointi aloitetaan koneen raja-arvojen määrittämisellä, minkä jälkeen arvioidaan koneen aiheuttamat vaarat ja vaaratilanteet. Tämän jälkeen arvioidaan vaaran aiheuttaman riskin suuruus ja merkitys. Mikäli arvioinnin perusteella riskiä on pienennettävä, vaarat poistetaan tai niitä pienennetään käyttämällä suojaustoimenpiteitä. Riskien arvioinnin tulokset huomioidaan koneen suunnittelussa ja rakentamisessa. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 12)

Vaikka konedirektiivin vaatimukset ovat pakottavia, ainoastaan suunniteltavaan koneeseen liittyvät vaatimukset huomioidaan. Riskien arvioinnin keskeinen tarkoitus onkin määrittää sovellettavat terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Neljännessä luvussa käsitellään riskin arviointia tarkemmin. Luvussa esitellään yhdenmukaistettu standardi SFS-EN ISO 12100, jota seuraamalla voidaan suorittaa riskien arviointi konedirektiivin vaatimusten mukaisesti.

Ensimmäinen liite määrittelee myös riskien pienentämisen periaatteet. Valmistajan on poistettava riskit tai pienennettävä niitä mahdollisimman paljon koneen rakenteen suunnittelulla. Niille riskeille, joita ei voida poistaa, tulee suunnitella suojaustoimenpiteitä vahinkojen välttämiseksi. Lisäksi koneen käyttäjää on tiedotettava koneen jäännösriskeistä sekä tarvittavista suojavälineistä ja koulutuksesta. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 13)

Riskien pienentämisen periaatteista on hyvä huomioida, että niiden käyttöjärjestys on määritetty edellä olevan kuvauksen mukaisesti. Koneen valmistajien on lähtökohtaisesti pyrittävä poistamaan koneessa olevat vaarat suunnittelun avulla. Koneita ei voida vain suunnitella valmiiksi ja sen jälkeen lisätä siihen suojalaitteita, vaan konedirektiivi velvoittaa toimimaan edellä kuvatulla tavalla. Viidennen luvun alussa kuvataan riskien pienentämisen strategiaa tarkemmin, minkä jälkeen esitetään strategian mukaisia toimenpiteitä riskien pienentämiseksi.

Jos kone suunnitellaan yhdenmukaistetun standardin mukaisesti, pidetään sitä myös siltä osin olennaisten turvallisuus- ja terveystaakavien mukaisena. Viranomaisten on lähtökohtaisesti pidettävä CE-merkittyjä koneita konedirektiivin vaatimusten mukaisina. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 6) Yhdenmukaistettujen standardien käyttö yksinkertaistaa koneen turvallisuuden suunnittelua. Valmistaja voi seurata standardin asettamia vaatimuksia, minkä jälkeen voidaan olettaa koneen olevan turvallinen käyttäjälle. Yksittäinen standardi ei kuitenkaan kata kaikkia konedirektiivin liitteen 1 vaatimuksia, joten valmistajan on varmistettava kaikkien vaatimusten täyttyminen.

Koneen suunnittelussa ei kuitenkaan ole pakko seurata standardeja. Jos koneen valmistaja ei noudata yhdenmukaistettua standardia, on varmistuttava, että ratkaisut ovat turvallisuudeltaan vähintään samaa tasoa standardin kanssa. (Siirilä, 2016, s. 88) Konedirektiivi on luonteeltaan velvoittavaa lainsäädäntöä, kun taas standardit ovat lähtökohtaisesti ohjeistavia.

Nivelpuomikevennin koostuu useista sadoista osista. Siinä on sähkömoottori sekä nostoliike ja se on tarkoitettu kappaleiden siirtämiseen. On siis selvää, että tutkimuksen kone kuuluu konedirektiivin piiriin. Seuraavaksi luvussa 3.2 käsitellään tarkemmin standardeja, joiden avulla konedirektiivin vaatimuksiin vastataan. Luvussa kuusi esitetään muita konedirektiivin vaatimuksia, jotka on täytettävä ennen koneen markkinoille saattamista.

## 3.2 Standardit

Ennen 1980-luvun loppua standardeilla oli huomattavasti pienempi merkitys koneen turvallisuuden sääntelyssä. Koneiden yksityiskohtaisista turvallisuusvaatimuksista säädettiin tuolloin suoraan direktiiveissä. Teknisiä yksityiskohtia sisältävien direktiivien ylläpitäminen osoittautui haastavaksi, koska tekniikka kehittyi nopeasti. Uuden lähestymistavan mukaan direktiiveissä säädetään yleisistä vaatimuksista ja tavoitteista. Eurooppalaiset EN-standardit antavat yksityiskohtaisia vaatimuksia, ohjeita ja ratkaisuja direktiivien vaatimusten täyttämiseksi. (Siirilä, 2016, s. 34,87) Standardit ovatkin nykyään keskeisessä osassa koneiden suunnittelutyötä.

Standardia voidaan hyödyntää direktiivien vaatimusten täyttämiseksi, mikäli se on yhdenmukaistettu. Standardista tulee yhdenmukaistettu, kun sen viitetiedot on julkaistu Euroopan unionin virallisessa lehdessä (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY). Standardeissa voi olla viitteitä myös muihin standardeihin. Näitä viitestandardeja on myös noudatettava, jotta alkuperäisen standardin vaatimukset täyttyvät. Viitestandardeja käytetään, koska EN-standardien laadinnassa periaatteena on, ettei samoja vaatimuksia toisteta eri standardeissa (Siirilä, 2016, s. 91).

Standardit jakaantuvat kolmeen tasoon. A-tyyppin standardit asettavat yleisiä toimintaperiaatteita ja näkökohtia turvallisuudesta. Tällainen on esimerkiksi standardi SFS-EN ISO 12100, joka määrittelee riskin arviointi prosessia ja koneiden yleistä turvallisuutta. B-tyyppin standardit ovat turvallisuuden ryhmästandardeja, jotka käsittelevät tiettyjä turvallisuusnäkökohtia tai suojalaitteita, joita voidaan hyödyntää laajasti erilaisten koneiden suunnittelussa. B-tyyppin standardit jaotellaan turvallisuusnäkökohtia kuten turvaetäisyyksiä käsitteleviin (B1) ja yksittäisiä suojalaitteita kuten suojuksia koskeviin (B2) standardeihin. Konekohtaisia turvallisuusvaatimuksia käsitellään C-tyyppin standardeissa. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 5)

On hyvä huomioida, että C-tyyppin standardien vaatimuksia on noudatettava, mikäli ne ovat ristiriidassa A- tai B-tyyppin standardien vaatimusten kanssa (SFS-EN 14238, 2005, s. 4). Suunnittelussa on huomioitava konetyyppikohtaisen standardin vaatimukset ensisijaisesti. Suunnittelijan on B-tyyppin standardeja käyttäessään varmistettava, ettei konekohtaisessa C-tyyppin standardissa ole tiukempia vaatimuksia turvallisuudelle.

Tämän luvun alaluvuissa käsitellään eri standardeja ja niiden asettamia vaatimuksia tutkimuksen koneen suunnittelulle. Koneesta tulee turvallinen, kun suunnittelussa seurataan standardien asettamia vaatimuksia. Suunnitteluun on varattava riittävästi aikaa ja

suunnittelun on oltava systemaattista. Koneen suunnittelussa keskitytään usein tuotantokäyttöön ja jätetään muut elinkaaren vaiheet huomioimatta, mikä näkyy koneilla sattuneissa onnettomuuksissa (Siirilä, 2016, s. 65). Jos suunnittelussa ei huomioida riittävästi esimerkiksi huoltotilanteita, saattaa käyttäjälle tulla tarve käyttää konetta vaarallisesti tai ohittaa sen turvaominaisuuksia.

### **3.2.1 Käsin ohjattavat kuorman käsittelylaitteet**

Turvallisuuden ja koneen suunnittelun kannalta merkittävin standardi tässä työssä on C-tyyppin standardi SFS-EN 14238, joka käsittelee käsin ohjattavia kuorman käsittelylaitteita. Käsittelylaite on standardin määritelmän mukaan kone, jossa käyttäjä on kosketuksessa kuorman tai kuormanpitolaitteen kanssa (SFS-EN 14238, 2005, s. 7). Käsittelylaitteessa on tukirakenne, laitteet kuorman siirtämiseen ja kuormanpitolaite (SFS-EN 14238, 2005, s. 7). Nivelpuomikevennin on standardin määritelmän mukainen käsittelylaite, koska koneessa on tarttuja (kuormanpitolaite), nivelletty puomi ja nostoliike (laitteet kuorman siirtämiseen) ja runko (tukirakenne). Käyttäjä ohjaa kuormaa vaikuttamalla suoraan tarttujan liikkeisiin. Seuraamalla standardin vaatimuksia, voidaan olettaa koneen olevan standardin käsittelemien riskien osalta konedirektiivin vaatimusten mukainen.

Standardi kattaa vain koneen merkittävät vaarat, jotka ovat pääasiassa koneen käytön aikaisia. Siinä ei myöskään käsitellä koneen rakentamiseen, kuljetukseen, käytöstäpoistoon tai hävittämiseen liittyviä vaaroja. (SFS-EN 14238, 2005, s. 5) Myös standardin ulkopuolelle jäävät vaarat pitää huomioida koneen suunnittelussa. Vaarat tunnistetaan riskin arvioinnissa ja suunnitteluvaiheessa varmistetaan riittävät toimenpiteet riskien pienentämiseksi. Kun myös kaikki laitekohtaisen standardin ulkopuoliset vaarat huomioidaan suunnittelussa, valmis kone on konedirektiivin vaatimusten mukainen.

Käsittelylaitestandardi esittelee koneeseen liittyvät merkittävät vaarat ja ratkaisut tai vaatimukset, mitä seuraamalla vaarat tulevat huomioiduksi koneen suunnittelussa. Standardi on laadittu siten, että se käsittelee kaikkia merkittäviä siihen kuuluvien koneiden vaaroja. Vähemmän merkittävien vaarojen tunnistamiseen ja käsittelyyn saa opastusta SFS-EN ISO 12100 -standardista. Yksittäisessä koneessa ei kuitenkaan usein ole kaikkia standardin listaamia vaaroja. Kun tunnistetaan koneessa olevat vaarat, voidaan tehdä päätös mitä standardin vaatimuksia huomioidaan suunnittelussa. Esimerkiksi tämän tutkimuksen koneessa ei käytetä hydraulikkaa, joten sitä koskevia vaatimuksia ei tarvitse huomioida suunnittelussa. Jotta koneen valmistaja voi sanoa noudattaneensa standardia on kuitenkin huomioitava jokainen suunniteltavaa konetta koskeva vaatimus, jonka standardi esittää.

Käsittelylaitteen tukirakenteen eli koneen rungon on täytettävä asetetut vaatimukset. Nivelpuomikeventimen suunniteltu käyttöikä on alle 20 000 sykliä, koska konetta käytetään paikassa, jossa käyttö ei ole jatkuva. 20 000 sykliä vastaa kymmenen vuoden käyttöä suunnitellulla käytötavalla. Rakenne voidaan suunnitella siten, että kaksinkertainen maksimikuorma ei aiheuta rakenteeseen pysyviä muodonmuutoksia eikä kolminkertainen maksimikuorma riko rakennetta (SFS-EN 14238, 2005, s. 10). Jos koneen käyttöikä olisi yli 20 000 sykliä, asettaisi se rakenteella väsymisvaatimuksia EN 13001 standardin osista 1 ja 2 (SFS-EN 14238, 2005, s. 10).

Mekaanisen kestävyuden lisäksi koneen rakenteelle on muitakin vaatimuksia. Standardin (SFS-EN 14238, 2005) mukaan rakenteessa ei saa olla teräviä kulmia tai reunoja, jotka voivat aiheuttaa käyttäjälle vammoja. Myös kulkeuma eli nostettavan kuorman odottamattomat liikkeet on estettävä. Mikäli vaaravyöhykkeillä aiheutuvia riskejä ei muulla tavoin hallita, on suunnittelussa huomioitava turvaetäisyyksiä määrittävät standardit. (SFS-EN 14238, 2005, s. 10) Suuri osa nivelpuomikeventimen komponenteista on ohutlevystä valmistettuja, joten terävät kulmat vältetään särmien taivutussäteillä ja laserleikkeiden kulmien pyörityksillä. Puomin kulkeuman estämiseksi valitaan moottorille lukittava vaihde, joka estää puomin laskeutumisen moottorin ollessa virrattomana. Vaaravyöhykkeelle pääsy estetään kiinteillä suojuksilla, joiden suunnittelun vaatimuksia esitetään luvussa 3.2.3.

Nivelpuomikeventimen tarttujalle (kuormanpitolaite) on monia vaatimuksia, koska käyttäjälle aiheutuvat vaarat putoavista kappaleista on hallittava. Standardin (SFS-EN 14238, 2005) mukaan kuorman siirron on oltava turvallista, kun tarttujaa käytetään valmistajan ohjeiden mukaisesti. Valmistajan on myös varmistettava, että tarvittava pitovoima kuorman käsittelyyn on käytössä koko kappaleen käsittelyn ajan. Lisäksi kappaleen kiihtyvyydet on huomioitava pitolaitteen suunnittelussa. (SFS-EN 14238, 2005, s. 13) Näiden vaatimusten täyttämiseksi on esitetty tarkempia vaatimuksia erityyppisille kuormanpitolaitteille.

Tutkimuksen koneen kuormanpitolaitteeksi vaihtoehtoina ovat magneettinen tarttuja ja paineilmalla toimiva puristin. Standardin (SFS-EN 14238, 2005, s. 14) mukaan kesto-  
magneetilta vaaditaan kolminkertainen pitovoima verrattuna nostoon tarvittavaan voimaan. Tämän lisäksi käyttäjälle on selvästi viestittävä magnetoinnin tila. Kitkaan perustuvissa puristimissa pitovoiman on puolestaan oltava vähintään kaksinkertainen verrattuna kappaleen nostamiseen tarvittavaan voimaan. Nostotoiminto ei saa alkaa ennen riittävän puristus-paineen aikaansaamista ja ylläpitoa. Kappale on myös pidettävä turvallisesti kiinni kahden minuutin ajan, mikäli koneessa on tehonsyötön häiriö. Tehonsyötön

häiriöstä on varoitettava käyttäjää visuaalisesti tai äänimerkillä (SFS-EN 14238, 2005, s. 14) Suunnitteluratkaisut näiden vaatimusten täyttämiseksi esitetään luvussa 5.2.

Koneen sähkökäyttöisten liikkeiden on oltava nopeudeltaan sellaisia, että käyttäjä pystyy hallitsemaan kuorman liikkeitä (SFS-EN 14238, 2005, s. 15). Suunniteltavassa nivelpuomikeventimessä tämä tarkoittaa nosto- ja laskunopeuden rajoittamista riittävän matalaksi. Suurimmat nopeudet määritetään ensimmäiselle koneelle tehtävien testien perusteella sellaiseksi, että liikkeen hallinta on mahdollista. Myöskään tehölähdevika ei saa aiheuttaa käyttäjälle vaaroja tai riskejä (SFS-EN 14238, 2005, s. 15). Nostettava kappale ei saa pudota eikä puomi laskeutua painovoimaisesti, jos koneen sähkönsyöttö katkeaa.

Käsittelylaitteiden C-tyyppin standardissa on useita viitestandardeja, joita tulee noudattaa. Esimerkkinä näistä voidaan mainita nostureiden hallintalaitteita ja ohjauspaikkoja käsittelevä SFS-EN 13557. Moni standardin vaatimuksista ei koske tämän tutkimuksen konetta, mutta muutamia huomioitavia vaaroja käsitellään. Ohjausvipujen liikkeiden pitää vastata nosturin liikkeitä aina kun mahdollista (SFS-EN 13557, 2008, s. 9). Nivelpuomikeventimessä tämä vaatimus liittyy nostoliikkeen ohjaukseen keinukytkimen avulla. Keinukytkimen painallus ylöspäin saa aikaan puomin liikkeen ylöspäin. Koneen liike saa käynnistyä ainoastaan neutraalista asennosta, jotta tahattomat liikkeet voidaan välttää (SFS-EN 13557, 2008, s. 10). Seuraamalla standardin vaatimusta, estetään tahaton liike, vaikka keinukytkin olisi lukittunut johonkin asentoon. Tämä on otettava huomioon hätäpysäytystoiminnon suunnittelussa.

Tässä luvussa esitettyjen koneen suunnittelua koskevien vaatimusten lisäksi standardi kattaa muitakin vaatimuksia, joita löytyy konedirektiivin ensimmäisestä liitteestä. Esimerkiksi nostolaitteiden testauksen vaatimuksia esitetään luvussa 5.6 ja ohjeisiin sekä merkintöihin liittyviä vaatimuksia kuudennessa luvussa.

### **3.2.2 Ohjausjärjestelmien suunnitteluperiaatteet**

Koneiden ohjauksiin tarvitaan usein ehtoja, joiden avulla voidaan varmistaa koneen turvallisuus. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa käsiteltävässä koneessa täytyy estää käyttäjältä mahdollisuus kuorman vapauttamiseen kesken noston. Tällaisten toiminnot liittyvät suoraan käyttäjän turvallisuuteen ja sen vuoksi niille on asetettu erityisiä vaatimuksia vaarallisten vikaantumisten estämiseksi. Lähtökohtana on, että turvatoiminnoista rakennetaan luotettavia. Vaativimmissa tilanteissa yksittäisten komponenttien vikaantumiset eivät aiheuta toiminnon turvallisuuden menettämistä. Turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien periaatteita ja vaatimuksia käsitellään SFS-EN ISO 13849 -standardissa.

Standardin ensimmäinen osa käsittelee turvatoiminnon suunnittelua ja toinen osa suunnitellun toiminnon kelpuutusta.

Keskeinen lähtökohta on, että koneessa on sekä turvallisuuteen liittyviä että liittymättömiä ohjausjärjestelmän osia. Turvallisuuteen liittyvät osat on eriteltävä muista osista ja niiden haluttu toiminallisuus on määriteltävä tarkasti. Turvatoiminto on koneen ohjausjärjestelmän toteuttama toiminto, jonka vikaantuminen tai virhe voi asettaa käyttäjän terveyden vaaraan (Sundquist, 2019a, s. 6). Turvatoimintojen suunnittelussa tarvitaan erityistä huolellisuutta ja käsitystä vikaantumisesta, koska virheet tai odottamattomat vikaantumiset johtavat turvallisuuden menettämiseen.

Suoritustaso kuvastaa ohjausjärjestelmän osien kykyä suorittaa turvatoiminto (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 12). Suoritustaso (Taulukko 1) voidaan määrittää käyttämällä vaarallisen vikaantumisen todennäköisyydettä tuntia kohden ( $PFH_D$ ). Määrällisten muuttujien lisäksi ohjausjärjestelmän on täytettävä turvatasoja koskevat laadulliset vaatimukset. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 19)

**Taulukko 1. Suoritustasojen määritelmät (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 19).**

PL	$PFH_D$
a	$10^{-5} \leq PFH_D < 10^{-4}$
b	$3 \cdot 10^{-6} \leq PFH_D < 10^{-5}$
c	$10^{-6} \leq PFH_D < 3 \cdot 10^{-6}$
d	$10^{-7} \leq PFH_D < 10^{-6}$
e	$10^{-8} \leq PFH_D < 10^{-7}$

Kaikille koneen turvatoiminnoille on määriteltävä ominaisuudet ja vaadittava suoritustaso. Ominaisuudet ja suoritustaso on dokumentoitava turvallisuusvaatimusten eritteilyssä. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 19) Koneen kullekin toiminnolle tehdään siis määrittely itsenäisesti koneen koko ohjausjärjestelmän sijaan. Koneen turvatoimintojen suunnitteluprosessi on seuraava:

- Tunnistetaan koneen turvatoiminnot
- Määritetään kullekin turvatoiminnoille vaadittavat ominaisuudet
- Määritetään kullekin turvatoiminnoille vaadittu suoritustaso
- Toiminnon tekninen toteutus
- Arvioidaan teknisen toteutuksen saavuttama turvataso
- Suoritustason todentaminen  $PL \geq PL_r$
- Turvatoiminnon kelpuutus. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 21)



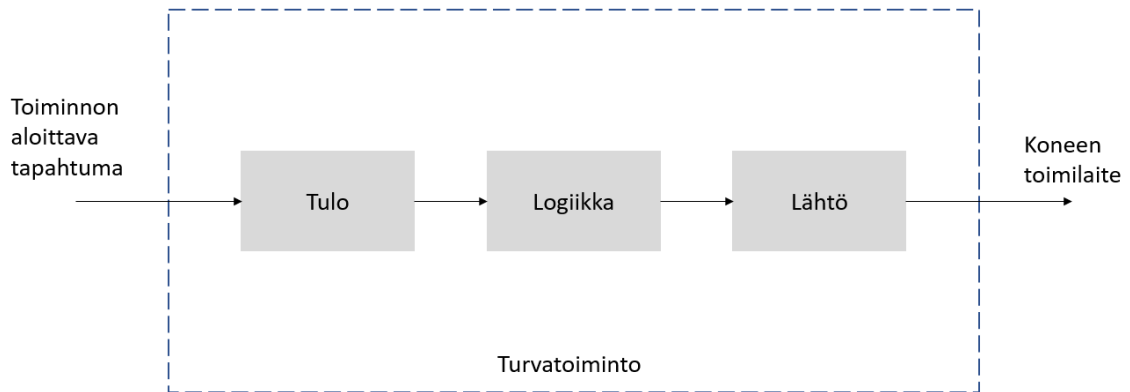
Turvatoimintojen tunnistamisessa voidaan hyödyntää riskien arviointia. Mikäli riskiä ei luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä ole saatu riittävän matalalle tasolle, tarvitaan turvatoimintoja. Turvatoimintoja voivat olla esimerkiksi odottamattoman käynnistymisen estäminen, hätäpysäytystoiminto tai turvallisuuteen liittyvä pysäytystoiminto (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 35). Turvatoimintojen tunnistamisen jälkeen voidaan määrittää jokaista turvatoimintoa koskevat vaatimukset. Standardissa esitetään koneelle tyypillisiä turvatoimintoja. Turvatoimintoja suunniteltaessa on seurattava standardin ja viitestandardien asettamia vaatimuksia. Mikäli suunniteltavalle turvatoiminnolle ei löydy suoria vaatimuksia standardista, on varmistuttava, että toiminnon vaatimukset määritellään riittävän kattavasti.

Hätäpysäytystoimintoa koskevat ISO 12100 luvun 6.3.5.2 vaatimukset ja lisätietoja toiminnosta löytyy standardista ISO 13850 ja standardin IEC 60204-1 luvusta 9.2.5.4 (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 37). Nostolaitteen tapauksessa hyödynnetään standardin IEC 60204 osaa 32. Hätäpysäytystoiminnosta on hyvä huomata, että se ei ole varsinainen turvatoiminto vaan täydentävä suojaustoimenpide.

Koneen turvatoiminnoille määritetään vaaditut suoritustasot. Vaadittuun suoritustasoon vaikuttavat mahdollisen vamman vakavuus, vaaralle altistumisen taajuus/kesto ja henkilön mahdollisuus välttää vaara tai rajata siitä aiheutuvaa vahinkoa merkittävästi. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 53–55) Vaadittu turvataso voidaan määrittää riskigraafin (Kuva 9) perusteella. Muuttujien luokkia valittaessa tarkastellaan tilannetta, jossa muut suunnittelun toimenpiteet on jo toteutettu. Suoritustasoa määritettäessä ei siis tarkastella alkuperäistä riskiä vaan suunnittelutoimenpiteiden jälkeistä riskiä.

Vamman vakavuutta kuvataan muuttujalla S ja se jakautuu luokkiin S1 ja S2. Vamman vakavuuden luokka on S1, kun seuraukset ovat palautuvia ja S2, kun seuraukset eivät palaudu (esimerkiksi suuren luun murtuma, kuolema). Vaaralle altistumisen taajuus kuvataan muuttujalla F. Mikäli vaaralle altistutaan useammin kuin kerran 15 minuutissa, taajuuden luokaksi valitaan F2. Luokaksi voidaan valita F1, mikäli vaaralle altistutaan harvemmin kuin kerran 15 minuutissa ja koneen käyttöajasta altistumisen osuus ei ylitä 5 prosenttia. Muuttujalla P kuvataan käyttäjän mahdollisuutta välttää vaara. Lähtökohtaisesti vaaran välttämiseen tulisi valita luokka P2. Ainoastaan tilanteessa, jossa on todellinen mahdollisuus välttää vaara tai rajata vahinkoa merkittävästi, voidaan valita luokka P1. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 53–55) Hyvä tapa toimia on valita lähtökohtaisesti kullekin muuttujalle pahempi luokka ja perustella huolellisesti, jos alempi luokka soveltuu tilanteeseen. Liian matala suoritustaso saattaa johtaa vaaratilanteisiin, jos toiminnon turvallisuus menetetään.

Vaaditun turvatason määrittämisen jälkeen voidaan suunnitella itse turvatoiminto. Turvatoiminnon yleinen periaate on, että se koostuu tulosta, logiikkaosasta ja lähdöstä (Kuva 4). Turvatoiminnon suunnittelussa yhdistetään kullekin turvatoiminnolle tulo, logiikka ja lähtö, minkä jälkeen voidaan arvioida saavutettua turvatasoa (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 22).



**Kuva 4. Turvatoiminnon yleinen rakenne perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 23).**

Turvatoiminnon suoritustasoon vaikuttaa määrällisiä ja laadullisia muuttujia. Vaarallisen vikaantumisen keskimääräinen aika ( $MTTF_D$ ), diagnostiikan kattavuus (DC), yhteisvikaantuminen (CCF) ja turvatoiminnon rakenne ovat määrällisiä muuttujia. Määrällisten muuttujien lisäksi on arvioitava turvatoiminnon vikaantumisen vaikutuksia, ympäristöolosuhteita ja suunnitteluvirheistä johtuvaa vikaantumista eli systemaattista vikaantumista. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 23–24)

Yhteisvikaantumisella tarkoitetaan usean kohdan tai komponentin vikaantumisesta yksittäisestä tapahtumasta johtuen (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 10). CCF koskee ainoastaan redundanttisia järjestelmiä kuten luokkia 2, 3 ja 4 (Sundquist, 2019a, s. 31). Yhteisvikaantumisen tarkastelu on oleellista kahdennetuissa järjestelmissä, koska niissä turvallisuus perustuu periaatteeseen, että toisen kanavan vikaantuessa toinen kanava pitää turvatoiminnon aktiivisena. Yhteisvikaantuminen aiheuttaisi molempien kanavien vikaantumisen ja samalla koko turvatoiminnon turvallisuuden menettämisen. Yhteisvikaantumista estetään erilaisilla toimenpiteillä, joita painotetaan pisteyttämällä. Turvatoiminto täyttää vaatimukset CCF:n suhteen, kun toimenpiteillä saavutetaan vähintään 65 pistettä mahdollisista 100 pisteestä (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 74).

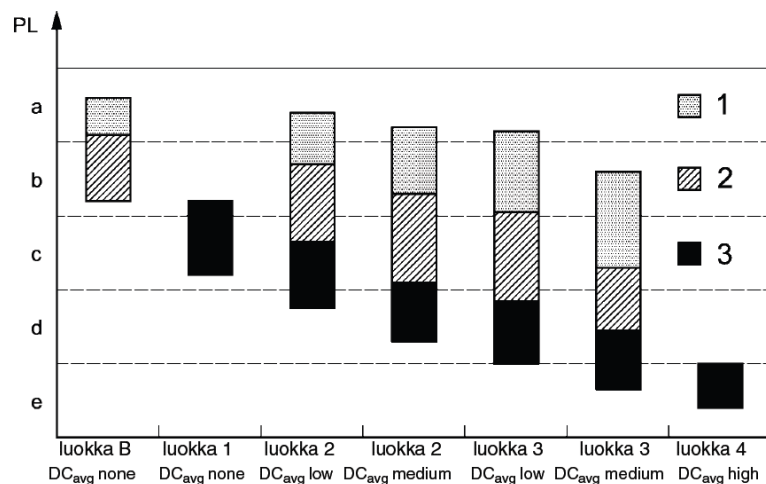
Määrällisten muuttujien arvioimiseksi on esitetty yksinkertaistettu menetelmä, jossa määritellään turvatoiminnolle luokat B,1,2,3 ja 4 (Kuva 5). Näille luokille on määritetty erikseen turvatoiminnon rakenne. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 26–27) Luokista käytetään toisinaan myös nimitystä kategoria. Kun turvatoiminto suunnitellaan rakenteen mukaiseksi, on yksinkertaista varmistua saavutetusta turvatasosta, kunhan huomioidaan myös laadulliset muuttujat. Tässä työssä hyödynnetään tätä yksinkertaistettua lähestymistapaa turvatoiminnon suunnitteluun.

Saavutettavaan turvatasoon vaikuttavat luokan lisäksi kyseisen turvatoiminnon  $MTTF_D$ , CCF ja  $DC_{avg}$  arvot. Kullekin kanavalle voidaan määrittää  $MTTF_D$  arvo, minkä jälkeen sitä voidaan tulkita taulukon 2 mukaan.

**Taulukko 2. Kanavan  $MTTF_D$  luokittelu perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 25).**

Merkintä	Vaihteluväli
Pieni - 1	$3 \text{ vuotta} \leq MTTF_D < 10 \text{ vuotta}$
Keskitaso - 2	$10 \text{ vuotta} \leq MTTF_D < 30 \text{ vuotta}$
Suuri - 3	$30 \text{ vuotta} \leq MTTF_D < 100 \text{ vuotta}$

Kun kanaville on laskettu  $MTTF_D$ -arvot, voidaan tilanne palauttaa yksikanavaisesti laskemalla arvo koko alijärjestelmälle. Pahimman tapauksen oletuksen mukaan voidaan valita huonompi arvo kanavien yhteiseksi arvoksi. Jos kanavilla on samat  $MTTF_D$ -arvot, käytetään sitä yhteisenä arvona. Kolmantena vaihtoehtona on määrittää yhteinen arvo SFS-EN ISO 13849-1 -standardin liitteessä D.2 esitetyllä symmetrintikaavalla. (Sundquist, 2019a, s. 25) Kuvassa 5 kuviointia numero 1 vastaa  $MTTF_D$  luokka pieni, numeroa 2 luokka keskitaso ja numeroa 3 vastaa luokka suuri.



**Kuva 5. Luokkien yhteys saavutettavaan suoritustasoon (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 28).**

Pylväsdiagrammin (Kuva 5) sijasta voidaan hyödyntää muitakin vaihtoehtoja suoritustason määrittämiseksi. Standardin liitteessä K esitetään myös kuvaa tarkempi taulukko numeeriseen valintaan, joka perustuu tarkkaan vaaralliseen keskimääräiseen vikaantumisaikaan (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 28). Taulukon avulla saadaan esimerkiksi turvatoiminnon alajärjestelmille tarkemmat  $PFH_D$ -arvot, jolloin koko turvatoiminnon suoritustaso voidaan määrittää tarkemmin. Standardin esittämien tapojen lisäksi voidaan käyttää apuna laskentaohjelmistoja, joiden avulla saadaan määritettyä turvatoiminnon suoritustaso. Esimerkiksi saksalaisen IFAn kehittämä SISTEMA on työkalu, jolla voidaan tehdä suoritustason arviointi SFS-EN ISO 13849-1 mukaan.

Edellä esitettyjen määrällisten muuttujien lisäksi turvatasoa määritettäessä on huomioitava myös laadullisia muuttujia. Arvioinnissa huomioidaan turvatoiminnon käyttäytyminen vikatilanteessa, turvallisuuteen liittyvä ohjelmisto, systemaattinen vikaantuminen ja turvatoiminnon kyky toteuttaa toiminto ennakoitavissa olevissa ympäristöolosuhteissa. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 23)

Standardin määrittelemissä rakenteissa (luokat) on huomioitu suunnittelukriteerit ja turvatoiminnon käyttäytyminen vikatilanteessa (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 24). Käyttämällä standardin mukaisia rakenteita, ei näitä asioita tarvitse huomioida suunnittelussa. Nivelpuomikeventimessä ei myöskään tarvitse huomioida ohjelmistoihin liittyviä vaatimuksia, koska turvatoiminnot toteutetaan turvareleillä. Koneen ympäristöolosuhteet ovat tavalliset teollisuuden hallitilat, joten nekään eivät muodosta ongelmaa. Systemaattinen vikaantuminen on otettava huomioon turvatoimintojen suunnittelussa.

Turvatoiminnon suoritustason määrittäminen yksinkertaistettua menetelmää käyttämällä voidaan esittää seuraavien vaiheiden avulla:

1. Määritetään suoritustaso alijärjestelmille (esim. tulo tai lähtö). Suoritustason määrittämiseksi valitaan rakenteen luokka ja selvitetään  $MTTF_D$ ,  $DC_{avg}$
2. Yhdistetään osien suoritustaso.
3. Varmistetaan luokkien 2, 3 ja 4 kohdalla yhteisvikaantumisen huomioimisesta.
4. Huomioidaan laadulliset muuttujat.

Turvatoiminnon suoritustason määrittämisen jälkeen on tehtävä todentaminen. Todentamisessa vertaillaan saavutettua turvatasoa ja aiemmin määritettyä vaadittua turvatasoa. Todentamisessa vaaditaan, että  $PL \geq PL_R$ . (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 35)

Tässä luvussa esitetty prosessi toistetaan koneen jokaiselle turvatoiminnolle, jotta voidaan varmistua ohjausjärjestelmän turvallisuudesta ja onnistuneesta riskien pienentämisestä. Ohjausjärjestelmän kelpuutusta käsitellään standardin toisessa osassa SFS-EN ISO 13849-2.

Ohjausjärjestelmän turvatoiminnot on kelpuutettava. Kelpuutuksella osoitetaan, että suunniteltu ratkaisu täyttää ISO 13849-1 vaatimukset (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 50). Kelpuutuksessa varmistetaan, että määritetty suoritustaso täyttää määritetyn luokan, systemaattisen vikojen huomioon ja ohjelmiston vaatimukset. Lisäksi varmistetaan kyvykkyydestä suorittaa turvatoiminto odotetuissa ympäristöolosuhteissa. Kelpuutus suoritetaan analyysimenetelmien ja tarvittaessa testausmenetelmien avulla. Kelpuutuksen tekijät eivät saa olla osallisia järjestelmän osien suunnitteluun. (SFS-EN ISO 13849-2, 2012, s. 10,12) Tässä työssä ei esitetä tarkemmin turvatoimintojen kelpuutusprosessia.

Luvussa 5.6 suunnitellaan edellä esitetyn prosessin mukaisesti koneelle turvatoiminto nostettavan kappaleen tiputtamisen estämiseksi. Turvatoiminnolta vaadittavan suoritustason määrittely esitetään luvussa 4.2.1.

### **3.2.3 Muut suunnittelussa huomioitavat standardit**

Edellä mainittujen keskeisimpien standardien lisäksi suunnittelussa hyödynnetään myös muita standardeja. Tässä luvussa on listattu vaatimuksia muista standardeista. Edellä ja tässä luvussa listattujen standardien lisäksi koneen suunnittelussa käytetään niiden viitestandardeja.

SFS-EN ISO 13850 asettaa vaatimuksia hätäpysäytystoiminnon suunnittelemiseksi. Hätäpysäytystoiminnolla pyritään torjumaan henkilöiden käyttäytymisestä tai odottamattomasta vaaratilanteesta johtuvat hätätilanteet. Koneen käyttöohjeissa on mainittava koneen tarkastuksesta ennen hätäpysäytyspainikkeen vapauttamista, jotta painikkeen painamisen syy voidaan havaita. (SFS-EN ISO 13850, 2015, s. 8,11) Tarkempia vaatimuksia hätäpysäytykselle on standardissa SFS-EN 60204-32, joka käsittelee nostokoneiden sähkölaitteistoja.

Pysähtymistoimintojen luokat ovat 0,1 ja 2. Luokan 0 pysäytyksessä toimilaitteelta poistetaan teho välittömästi. Luokan 1 pysäytyksessä toimilaitte puolestaan pysäytetään mahdollisimman nopeasti kontrolloidulla tavalla, minkä jälkeen tehonsyöttö katkaistaan. Viimeisessä pysäytystavassa (luokka 2) tehonsyöttöä ei katkaista ollenkaan, mutta pysäytystilaa valvotaan. (SFS-EN 60204-32, 2008, s. 104)

Hätäpysäytyksen on oltava pysäytysluokan 0 tai 1 mukainen ja pysäytyssignaalin on jäävä voimaan myös pysäytyslaitteen vapauttamisen jälkeen. Vaadittu luokka määritellään riskien arvioinnin perusteella. Hätäpysäytyksen kuittaaminen ei saa käynnistää koneen liikettä. Jokaisella nostokoneen ohjauspaikalla tulee olla hätäpysäytyslaite ja lisäksi hätäpysäytyslaitteita tulee olla paikoissa, joissa hätäpysäytystä voidaan tarvita. (SFS-EN 60204-32, 2008, s. 108–110, 132) Tässä esitetyt vaatimukset huomioidaan hätäpysäytystoiminnon suunnittelussa luvussa 5.6.

Standardin SFS-EN 60204-32 vaatimukset hätäpysäytykselle käsitellään tässä työssä, koska ne liittyvät suoraan koneen turvallisuuteen. Hätäpysäytystä käytetään ehkäisemään käyttäjälle sattuvia vahinkoja komponenttien vikaantuessa. Standardin muita vaatimuksia ei esitetä tai käsitellä tässä työssä, sillä ne liittyvät koneen sähkösuunnitteluun. Koneen yleisen turvallisuuden kannalta on kuitenkin tärkeää huomioida vaatimukset koneen sähköjärjestelmälle.

Koneen suojuksille asetetaan vaatimuksia SFS-EN ISO 14120 -standardissa. Tutkimuksen koneessa on ainoastaan kiinteitä suojuksia. Kiinteiden suojusten tulisi olla sellaisia, että niiden avaaminen ilman työkaluja ei ole mahdollista eivätkä ne pysy paikallaan ilman kiinnitystarvikkeita (SFS-EN ISO 14120, 2015, s. 18). Nivelpuomikeventimen tolpan huoltoluukut valmistetaan kahden millimetrin ohutlevystä ja ne ruuvataan kiinni tolpan sivupelteihin. Käyttäjä ei saa huoltoluukkuja auki ilman työkaluja eivätkä luukut (suorat levyt) myöskään pysy paikallaan ilman kiinnitystarvikkeita.

## 4. RISKIN ARVIOINTI

Tässä luvussa esitellään riskin arvioinnin yleisiä periaatteita sekä työkaluja riskin arvioinnin suorittamiseksi. Kappaleen lopussa esitetään tutkimuksessa käsitellyn koneen riskin arviointi. Riskin arvioinnin tulokset huomioidaan koneen turvallisuuden suunnittelussa luvussa viisi. Suunnittelutoimenpiteiden jälkeiset jäännösriskit esitellään alaluvussa 4.3.3 ja jäännösriskit huomioidaan markkinoille saattamista käsittelevässä luvussa 6.

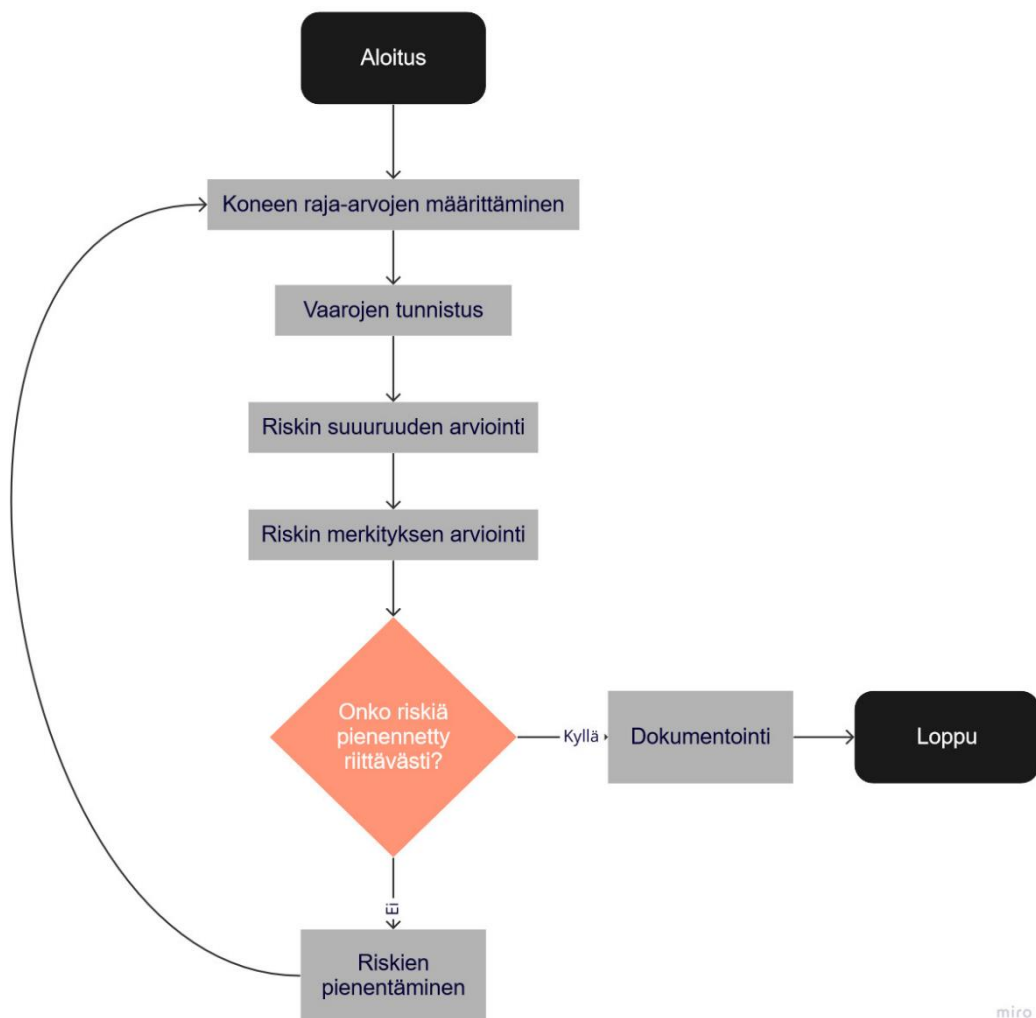
### 4.1 Periaatteita

Riskillä tarkoitetaan tarkasteltavan vahingon vakavuuden ja vahingon esiintymistodennäköisyyden yhdistelmää. Vaaralla puolestaan tarkoitetaan mahdollisen vahingon lähdettä ja se voi olla pysyvästi läsnä, kuten koneen osien vaarallinen liike tai ilmaantua yllättäen, kuten liikkeen odottamaton käynnistyminen. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 7–8) Riskin arviointiin liittyvien käsitteiden ymmärtäminen on keskeistä perustietoa, joka jokaisen riskin arviointiin osallistuvan on hallittava.

Jokaiselle Euroopassa markkinoille saatetulle koneelle tulee suorittaa riskin arviointi. Koneen valmistajan on riskin arvioinnin perusteella määritettävä konetta koskevat terveys- ja turvallisuusvaatimukset (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 12). Riskin arviointi on luonteeltaan iteratiivista. Suunnittelun alkuvaiheessa riskin arvioinnilla tunnistetaan käyttäjälle aiheutuvat riskit ja suunnitellaan kone turvalliseksi. Suunnitteluprosessin edetessä riskin arviointia jatketaan ja varmistetaan, että kone on sovellettavien vaatimusten mukainen. Suunnitellut turvallisuusratkaisut saattavat muodostaa uusia riskejä. Myös ne on arvioitava ja toteutettava tarvittavat toimenpiteet riskin pienentämiseksi.

Riskin arvioinnin prosessi on esitetty kuvassa 6. Prosessin ensimmäiset vaiheet, joita ovat koneen raja-arvojen määrittäminen, vaarojen tunnistus ja riskin suuruuden arviointi, muodostavat riskianalyysin (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 15). Riskin suuruuden arvioinnissa riskiä kuvataan numeerisilla tai laadullisilla kuvauksilla. Riskianalyysin perusteella muodostuu käsitys koneessa olevista riskeistä, minkä jälkeen voidaan arvioida niiden merkitystä. Riskin merkityksen arvioinnissa tarkastellaan, pitääkö riskiä vielä pienentää vai onko se hyväksyttävällä tasolla.

Riskin arviointi aloitetaan koneen raja-arvojen määrittelyllä. Tämä on tehtävä huolellisesti, jotta riskin arvioinnista saadaan luotettavia tuloksia. Raja-arvojen määrittelyn tavoitteena on saada selkeä käsitys koneen ominaisuuksista, toiminnasta, tarkoitetusta käytöstä, käyttöympäristöstä ja ennakoitavissa olevasta väärinkäytöstä (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 12). Kohtuudella ennakoitavalla väärinkäytöllä tarkoitetaan ihmisten unohtavuutta, erehtyvyyttä ja riskien ottamista (Siirilä, 2016, s. 211). Heti koneen suunnittelun ja riskin arvioinnin alkuvaiheessa on huomioitava millaisia riskejä käyttäjä voisi ottaa konetta käyttäessään. Lähtökohtaisesti käyttäjä pyrkii tekemään työnsä mahdollisimman pienin ponnisteluin, mikä usein johtaa turvallisten työtapojen laiminlyöntiin tai suojalaitteiden ohittamiseen. Kone on suunniteltava siten, että tällaisesta toiminnasta ei aiheudu käyttäjälle haittaa.

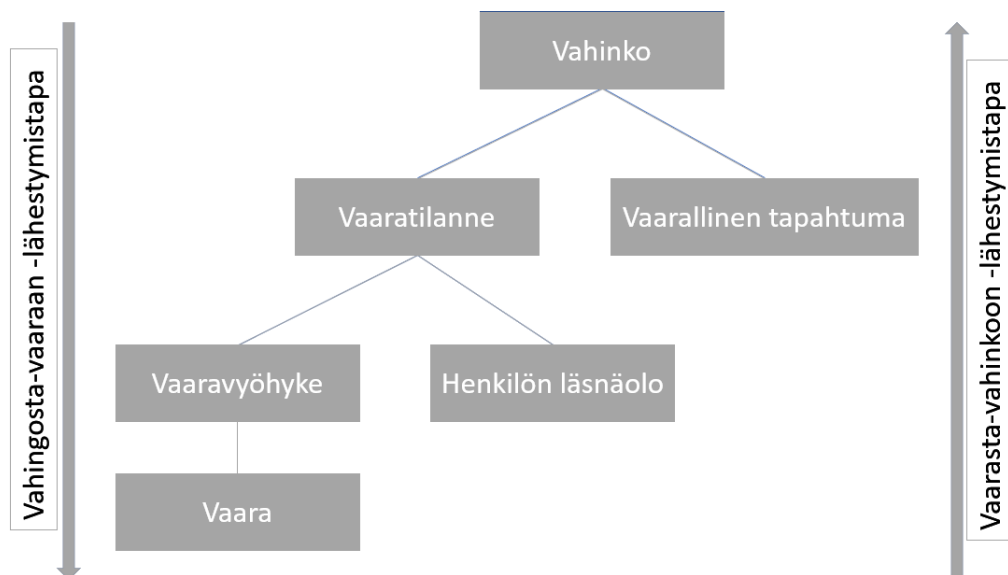


**Kuva 6. Riskien arviointi -prosessi perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 15).**



Vaarojen tunnistus on keskeinen osa riskianalyysiä, mikä vaatii suorittajalta huolellisuutta. Kaikki koneessa olevat vaarat on tunnistettava. Tunnistamattomiin vaaroihin liittyvät riskit jäävät arvioimatta ja riskien pienentämistoimet toteuttamatta koneen suunnitteluvaiheessa. Seurauksena koneeseen jää piileviä riskejä, jotka saattavat jossain tilanteessa aiheuttaa vakavan tapaturman tai muun terveyden menettämisen (Siirilä, 2016, s. 178).

Standardissa SFS-EN ISO 12100 esitetään toimintatapa vaarojen tunnistamiseksi. Vaarojen tunnistamisessa voidaan hyödyntää vahingosta-vaaraan tai vaarasta-vahinkoon -lähestymistapoja. Menetelmissä tunnistetaan kaikki vaaraan liittyvät tekijät. Näitä ovat itse vaara, vaaravyöhyke, henkilön läsnäolo, vaaratilanne, vaarallinen tapahtuma ja vahinko (Kuva 7). (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 14) Menetelmän avulla saadaan hyvä käsitys vaarasta ja siihen vaikuttavista tekijöistä, minkä jälkeen riskin suuruuden arviointi on helpompaa.



**Kuva 7. Vaarojen tunnistamisen työkalu perustuen lähteeseen (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 14).**

Monesti on luontevaa edetä vahingosta vaaraan. Esimerkiksi klapisirkkelillä voidaan helposti havaita mahdollisuus sormen leikkautumiseen (vahinko). Tästä voidaan tunnistaa vaarallinen tapahtuma (ihminen liikuttaa sormensa sirkkelin terään sahatessaan). Vaaravyöhykkeenä on terän ympäristö ja vaarallisen tapahtuman toteutumisen mahdollistaa ihmisen läsnäolo. Vaara (vahingon lähde) on pyörivä sirkkelinterä.

Edellä kuvattujen menetelmien lisäksi erilaiset tarkastuslistat auttavat koneeseen liittyvien vaarojen tunnistamisessa. Tarkastuslistoja usein esiintyvistä vaaroista löytyy riskien arvioinnin perusteita käsittelevässä ISO 12100 -standardista ja konekohtaisista C-tyyppin

standardeista. Vaarojen tunnistamisessa ei saa tukeutua liikaa listoihin, vaan on varmistuttava, että myös kaikki suunnitteilla olevaan koneeseen liittyvät vaarat tunnistetaan.

Koneessa voi olla erityisiä vaaroja, joita ei yleisistä listauksista löydy. Tällaiset vaarat voivat liittyä yksittäiseen suunnitteluratkaisuun tai koneen ominaisuuteen, minkä vuoksi niitä ei voida huomioida yleisissä standardeissa. Jotta kaikki vaarat ja mahdolliset seuraamukset tulisivat huomioiduksi, kannattaa arvioinnissa hyödyntää mahdollisimman laajaa tietämystä. Esimerkiksi käyttäjien, suunnittelijoiden ja mahdollisten ulkopuolisten arvioijien näkemykset kannattaa huomioida riskejä tunnistettaessa.

Riskin suuruuden arvioinnissa on hyvä huomioida, että riski muodostuu kahdesta muuttujasta. Riskin suuruutta arvioitaessa onkin valittava muuttujien eli vahingon vakavuuden ja todennäköisyyden yhdistelmä siten, että ne muodostavat suurimman riskin. Saattaa esimerkiksi olla, että todella vakava vahinko on myös erittäin epätodennäköinen. Tällaisessa tilanteessa hieman pienempi vahinko saattaa kuitenkin olla todella todennäköinen ja johtaa suurempaan riskiin.

Riskianalyysin jälkeen arvioidaan riskin merkitystä. Tämän vaiheen tavoitteena on valita vaaratilanteet, jotka vaativat toimenpiteitä riskien pienentämiseksi. Lisäksi arvioidaan, onko riskien pienentäminen aiheuttanut uusia riskejä tai suurentanut muita olemassa olevia riskejä. Riskien merkityksen arvioinnissa suunniteltavan koneen riskejä voidaan esimerkiksi verrata vastaavan vaatimukset täyttävän koneen riskeihin. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 26) Keinoja riskien pienentämiseksi käsitellään viidennessä luvussa. Riskiä on pienennetty riittävästi, kun

- kaikki toimintaolosuhteet on huomioitu
- vaarat on poistettu tai riskit ovat pienimmällä käytännössä mahdollisella tasolla
- myös uudet vaarat on käsitelty riskin arvioinnissa
- käyttäjää varoitetaan jäljelle jäävistä jäännösriskeistä
- suojaustoimenpiteet ovat yhteensopivia
- huomioidaan myös muu kuin teollinen käyttö
- suojaustoimenpiteet eivät vaikeuta liikaa käyttäjän työskentelyä. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 26)

Turvallisuusratkaisuja, joista muodostuva riski on suurempi kuin alkuperäisestä vaarasta, tulisi välttää. Vaikka uuteen vaaraan liittyvää riskiä pystyttäisiin pienentämään, on vaara kuitenkin olemassa, jos suojaustoimenpiteiden vaikuttavuus jostain syystä heikenee.

Kaikkia koneeseen liittyviä riskejä on mahdotonta poistaa, minkä vuoksi jokaisessa koneessa on jäännösriskejä. Jäännösriskien suuruus kuitenkin vaihtelee ja koneen valmistajan on pyrittävä suunnittelemaan koneesta mahdollisimman turvallinen, jotta jäljelle jäävät riskit olisivat hyväksyttävällä tasolla. Jäännösriskejä aiheuttavat esimerkiksi ihmisten käytös ja koneen komponenttien luotettavuus (Siirilä, 2016, s. 177). Työnantajan on hallittava koneiden jäännösriskejä valitsemalla kulloinkin työhön parhaiten soveltuva kone (Siirilä, 2016, s. 177).

Riskin arvioinnista on laadittava ja säilytettävä asiakirjat (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 48). Dokumentaatiossa on määriteltävä käytetty riskien arvioinnin menettely, arvioinnin tulokset ja tiedot arvioinnin kohteena olleesta koneesta. Arvioinnissa tehdyt oletamat kuten kuormat ja varmuuskertoimet on dokumentoitava. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 56) Myös tarvittava kunnossapito ja tarkastukset, joiden avulla suojaustoimenpiteet pysyvät kunnossa, on dokumentoitava. Riskien arviointiprosessi on dokumentoitava huolellisesti, jotta tehtyjä päätöksiä on mahdollista arvioida myöhemmin. Dokumentaatiota voidaan hyödyntää käyttöohjeita laadittaessa. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 48)

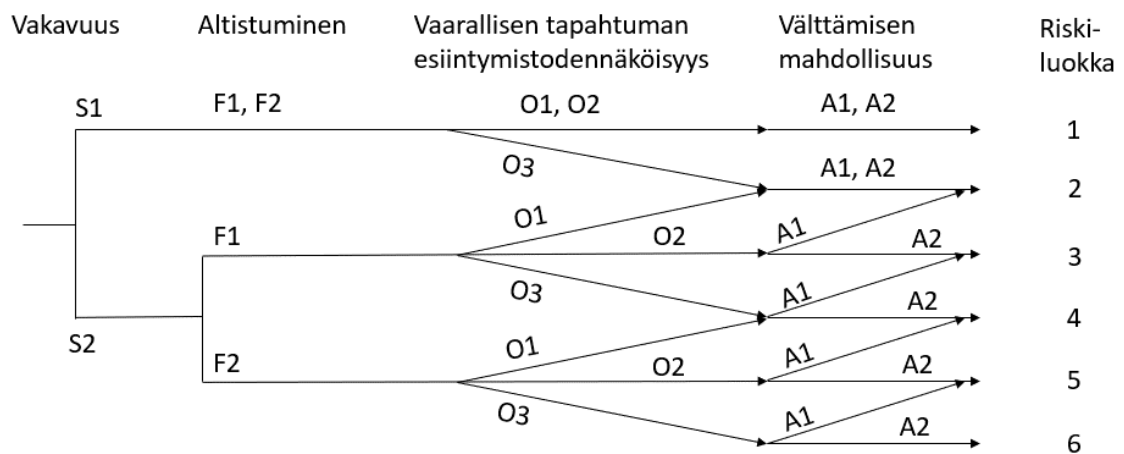
## 4.2 Riskin arvioinnin työkaluja

Riskin arviointiin on kehitetty useita työkaluja. Tässä luvussa käsitellään teollisuuden koneisiin hyödynnettäviä menetelmiä. Muitakin menetelmiä on olemassa ja riskien arvioijien tulisi valita tilanteeseen soveltuva työkalu. Työkaluihin tutustumalla ja niitä käyttämällä kehittyä käsitys menetelmien soveltuvuudesta tilanteeseen. Käytetystä työkalusta riippumatta arvioinnissa on seurattava edellä mainittua standardin ISO 12100 mukaista prosessia. Siten varmistutaan, että riskin arviointi on konedirektiivin periaatteiden mukainen. Riskin arvioinnin hyödyt saadaan ennemmin prosessin kurinalaisuudesta kuin tulosten tarkkuudesta, joten resurssit tulisi suunnata riskin pienentämiseen suuruuden arvioinnin sijaan (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 22).

Riskien arvioinnissa riski jaetaan vähintään kahteen muuttujaan. Nämä muuttujat ovat edellä mainitut riskin osatekijät eli vahingon vakavuus ja sen esiintymistodennäköisyys. Osassa työkaluissa riski jaetaan vielä useampaan muuttujaan. Arvioitaessa valitaan riskin muuttujalle vaaratilannetta parhaiten kuvaava luokka. Kun muuttujien luokat ovat selvillä, voidaan riskin suuruutta arvioida taulukoiden, laskutoimitusten tai kuvaajien avulla. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 22) Tähän periaatteeseen perustuvat kaikki koneiden riskien arvioinnin työkalut.

## 4.2.1 Riskigraafi

Päätöspuusta on johdettu riskien arvioimiseen tarkoitettu riskigraafi (Kuva 8). Kaavion solmukohdissa valitaan suunta riskin muuttujan perusteella. Riskiä arvioidaan riskigraafissa neljän muuttujan avulla. Muuttujia ovat vakavuus, altistuminen, vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyys ja välttämisen mahdollisuus. Kaavion haarat kuvaavat muuttujan luokkaa. Solmukohdassa voisi olla esimerkiksi muuttujana vahingon vakavuus ja sen jälkeisinä haaroina "lievä" ja "vaikea". (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 26–28)



**Kuva 8. Riskigraafi perustuen lähteeseen (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 30).**

Vahingon vakavuus voidaan jakaa lieviin vammoihin (S1) ja vakaviin vammoihin (S2). Lieviä vammoja ovat palautuvat vammat kuten viillot ja mustelmat. Lievästä vammasta johtuen työntekijä menettää työkyvyn korkeintaan kahdeksi päiväksi. Vakava vamma puolestaan tarkoittaa pysyvää haittaa (esimerkiksi luun murtuma) tai työkyvyn menetystä yli kahden päivän ajaksi. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 28)

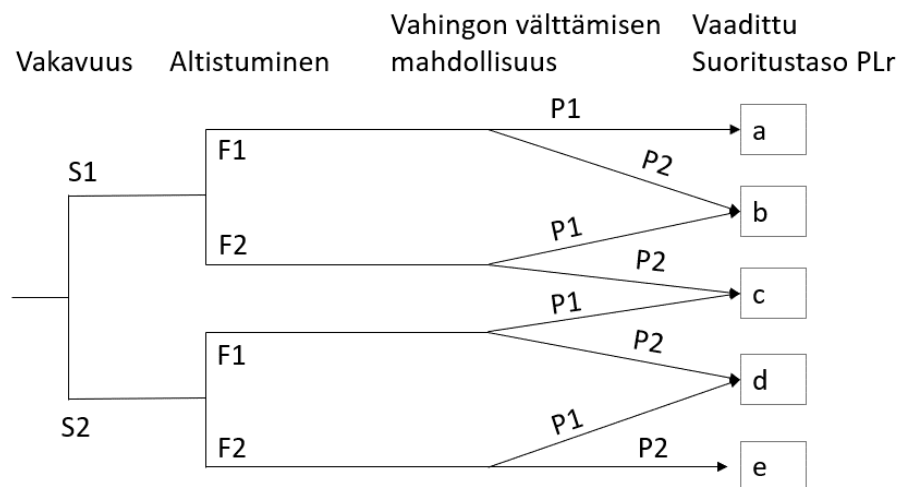
Vaaralle altistumista kuvataan myös kahdella tasolla. Altistuminen tapahtuu harvoin (F1), kun vaaralle altistutaan korkeintaan kaksi kertaa työvuorossa tai enintään 15 minuutin ajan. Näiden raja-arvojen ylittyessä altistumisen luokka on F2. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 28)

Vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyys jakautuu kolmelle tasolle, jotka ovat O1, O2 ja O3. Alimmalla tasolla O1 tapahtuma on niin epätodennäköinen, että se ei ehkä toteudu. Korkeimmalla tasolla O3 vaarallinen tapahtuma tapahtuu todennäköisesti useasti. Keskimmaisella tasolla O2 voidaan olettaa, että vaarallinen tapahtuma tapahtuu jossain koneen elinkaaren vaiheessa. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 28)

Graafin viimeinen muuttuja kuvaa vahingon välttämisen tai rajoittamisen mahdollisuutta. Mikäli käyttäjän on mahdollista välttää tai rajoittaa vahinkoa, kyseessä on taso A1, muuten kyseessä on taso A2. Tämä edellyttää, että käyttäjä pystyy havaitsemaan vaaratilanteen ja tuntee tilanteeseen liittyvät riskit. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 28) Vahingon välttämisen mahdollisuutta on vaikea arvioida luotettavasti. Vaikka vaara olisi tiedossa tai se olisi aistein havaittavissa, ei voida luottaa, että kaikki koneen kanssa työskentelevät välttäisivät vaaraa. Työtilanteissa otetaan usein tarkoituksella riskejä, vaikka vaaran olemassaolo tiedostetaan. (Siirilä, 2016, s. 210)

Kun riskin jokaiselle muuttujalle on määritetty arvo, voidaan tutkittavan riskin riskiluokka määrittää seuraamalla riskigraafia. Riskiluokat 1 ja 2 tarkoittavat pientä riskiä, riskiluokat 3 ja 4 keskimääräistä riskiä ja riskiluokat 5 ja 6 suurinta riskiä. Riskigraafi ei sovellu kovin hyvin hitaiden vaarojen tutkimiseen. Tällaisia voivat olla esimerkiksi ergonomiset vaarat. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 26,30) Riskigraafin käyttämiseksi on tarjolla valmis riskin arviointipohja (METSTA, 2020).

Riskigraafia voidaan hyödyntää myös kuvaamaan suojaustoimenpiteillä saavutettua riskin pienentymistä. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 26) Tässä tutkimuksessa hyödynnetään riskigraafia, jotta voidaan määrittää ohjausjärjestelmän turvafunktioille vaadittu suoritustaso  $PL_R$  (Kuva 9). Tässä esitetty riskigraafi eroaa hieman kuvan 7 riskigraafista. Parametriin P on yhdistetty vaaran välttämisen mahdollisuus (A) ja vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyys (O) (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 54). Tuloksena ei saada riskiluokkaa vaan turvatoiminnolta vaadittava suoritustaso. Korkeampi suoritustaso kuvastaa suurempaa riskin pienennystä turvatoiminnon avulla.



**Kuva 9. Vaaditun suoritustason  $PL_R$  määrittäminen riskigraafin avulla perustuen lähtöteeseen (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, s. 55).**

Nivelpuomikeventimen turvatoimintojen vaaditut suoritustasot määritetään luvussa 5.5. Määrittäminen tehdään kuvan 9 perusteella.

## 4.2.2 Riskimatriisi

Riskimatriisi on moniulotteinen taulukko, jonka ulottuvuuksia ovat riskin muuttujat. Useimmiten riskien arviointiin käytettävät matriisit ovat kaksiulotteisia. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 22) Matriisit muodostetaan usein vahingon esiintymistodennäköisyyden ja vahingon vakavuuden perusteella. Käytettävästä matriisista riippuen muuttuja on saatettu jakaa luokkiin eri tarkkuudella, mikä näkyy matriisin rivien ja sarakkeiden lukumääränä. Muuttujilla voi olla esimerkiksi kolme luokkaa kuten kuvassa 10.

Vahingon  
esiintymistodennäköisyys

3	Kohtalainen riski	Merkittävä riski	Sietämätön riski
2	Siedettävä riski	Kohtalainen riski	Merkittävä riski
1	Vähäinen riski	Siedettävä riski	Kohtalainen riski
	1	2	3

Vahingon  
vakavuus

**Kuva 10. Riskien arviointi 3x3 matriisilla (Siirilä, 2016, s. 224).**

Kun sekä esiintymistodennäköisyydelle että vahingon vakavuudelle on valittu parhaiten kuvaava luokka, matriisista voidaan suoraan nähdä riskitaso. Matriisimenetelmän käyttö aloitetaan päättämällä vahingon vakavuuden luokka, minkä jälkeen määritetään vahingolle esiintymistodennäköisyys. (Siirilä, 2016, s. 224) Tämän työkalun etuja ovat yksinkertaisuus ja helppokäyttöisyys.

Vahingon esiintymistodennäköisyyttä arvioitaessa tulisi huomioida vaaralle altistumisen taajuus ja kesto sekä henkilön mahdollisuus välttää vahinkojen syntyminen. Myös inhimilliset tekijät, kokemukset käytettävästä koneesta, työtehtävät ja niitä suorittavat henkilöt tulisi huomioida todennäköisyyttä arvioitaessa. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 24). Ihmisen voi olla vaikea hahmottaa näitä kaikkia esiintymistodennäköisyyteen vaikuttavia asioita ja yhdistellä niitä yhdeksi arvoksi. Joissain tilanteissa voikin olla hyödyllistä käyttää riskin suuruuden arviointiin menetelmää, joka jakaa riskin muuttujat useampaan apumuuttujaan, jolloin voidaan keskittyä yhteen osa-alueeseen kerrallaan. Esimerkiksi Hazard Rating Number -menetelmässä käytetään useampia muuttujia.

Edellä esitetyn matriisin käyttöön liittyy myös ongelmia. Riskin ollessa kohtalainen, merkittävä tai sietämätön, koneeseen tulisi tehdä toimenpiteitä riskien pienentämiseksi. Usein kuitenkin koneen ominaisuuksista riippuen vahingon vakavuus saattaa olla suurin mahdollinen (3). Tässä tapauksessa riskiä ei saada menetelmän mukaan hyväksyttävälle tasolle, vaikka vahingon esiintymistodennäköisyys olisi todella pieni. (Siirilä, 2016, s. 224) Tällaisissa tilanteissa voidaan käyttää suurempia matriiseja, joissa muuttujat jaetaan useampiin luokkiin. On myös mahdollista kiinnittää erityistä huomiota tällaisiin riskeihin ja arvioida erikseen, onko riski hyväksyttävällä tasolla.

### 4.2.3 Numeerinen pisteytys

Kuten edellä käsitellyissä työkaluissa, myös numeerisessa pisteytyksessä riski jaetaan muuttujiin, joita arvioidaan erikseen. Laadullisten termien sijaan käytetään numeroita kuvaamaan muuttujien arvoja. Riskien suuruuden arvioinnissa voidaan hyödyntää monenlaisia numeeriseen pisteytykseen perustuvia työkaluja. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 32) Tässä luvussa esitetään yhteenlaskuun perustuva menetelmä, ja tutkimuksen koneelle on suoritettu riskien arviointi kertolaskuun perustuvalla HRN-menetelmällä.

Riskille saadaan pistemäärä ( $RS$ ) laskemalla yhteen riskin vakavuuden pistemäärä ( $SS$ ) ja todennäköisyyden pistemäärä ( $PS$ ) eli  $RS = PS + SS$ . Laadulliset kuvaukset helpottavat haarukoimaan valittavaa numeroarvoa, minkä jälkeen eri riskeihin liittyviä pienempiä eroja voidaan tuoda esille valitsemalla eri numeroarvoja. Taulukon 3 perusteella voidaan määrittää muuttujille numeroarvot ja tulkita saatua tulosta.

Vahingon vakavuus on vähäinen, kun sen hoitoon tarvitaan korkeintaan ensiapua. Vähäinen vamma aiheuttaa korkeintaan lyhyen poissaolon töistä. Kohtalainen vakavuus on kyseessä, kun vamma tai sairaus on edellistä merkittävämpi. Entiseen työhön paluu on kuitenkin mahdollista jossain vaiheessa. Vaikea vahinko tarkoittaa toimintaa haittaavaa vammautumista tai sairautta, josta paluu vanhaan työtehtävään ei ole mahdollista. Vahingosta aiheutuva kuolema tai invaliditeetti kuuluvat tuhoisaan luokkaan. Työhön paluu ei ole mahdollista. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 24)

Esiintymistodennäköisyyttä arvioitaessa valitaan kuvaus erittäin todennäköinen, kun vahinko tapahtuu lähes varmasti. Kun vahinko voi tapahtua, valitaan todennäköinen. Luokaksi valitaan epätodennäköinen, jos vahinkoa ei todennäköisesti tapahdu. Vaihtoehto erittäin epätodennäköinen voidaan valita ainoastaan, jos todennäköisyys on lähes nolla. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 26)

**Taulukko 3. Numeerisen pisteytyksen määräytyminen (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 32).**

<b>Vakavuus</b>	
Tuhoisa	$SS = 100$
Vaikea	$99 \geq SS \geq 90$
Kohtalainen	$89 \geq SS \geq 30$
Vähäinen	$29 \geq SS \geq 0$
<b>Todennäköisyys</b>	
Erittäin todennäköinen	$PS = 100$
Todennäköinen	$99 \geq PS \geq 70$
Epätodennäköinen	$69 \geq PS \geq 30$
Erittäin epätodennäköinen	$29 \geq PS \geq 0$
<b>Riskin pistemäärä (RS)</b>	
Suuri	$RS \geq 160$
Keskimääräinen	$159 \geq RS \geq 120$
Pieni	$119 \geq RS \geq 90$
Merkityksetön	$89 \geq RS \geq 0$

Numeerisista menetelmistä voi saada harhaanjohtavan kuvan todellisesta tilanteesta. Pistemäärä voidaan tulkita tarkkana ja objektiivisena arvona, vaikka todellisuudessa pisteiden määräytyminen ja siten myös kokonaisarvo ovat hyvin subjektiivisia asioita. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 32) Tästä huolimatta riskeille saadaan pistearvot ja näitä pistearvoja voidaan hyödyntää esimerkiksi suojaustoimenpiteiden priorisoinnissa. Suurimpia riskejä kannattaa pienentää ensimmäisenä, jotta niihin käytetään tarvittavat resurssit. Priorisointi ei kuitenkaan tarkoita, että pienempiä riskejä ei tarvitsisi huomioida suunnittelussa. Tässä ja muissakin menetelmissä subjektiivisuutta voidaan vähentää suorittamalla riskien arviointi ryhmätyönä, jolloin yksittäinen arvioitsija ei pääse vaikuttamaan lopputulokseen liikaa.

#### 4.2.4 HRN (Hazard Rating Number)

Hazard rating number (HRN) on yksi numeerisen arvioinnin työkaluista. HRN muodostuu riskin esiintymistodennäköisyydestä (LO), vaaralle altistumisen kestosta (FE), mahdollisen vamman vakavuusluokasta (DPH) ja vaaralle altistuvien henkilöiden määrästä (NP). HRN-menetelmä esiteltiin vuonna 1990 Chris Steelen kirjoittamassa artikkelissa ja se on sovellettavissa standardin ISO 12100 mukaiseen riskin arviointiin (Coulson, 2015). HRN-



arvo saadaan kertomalla eri osatekijöiden arvot keskenään ja saadun tuloksen merkitystä voidaan arvioida määritettyjen rajojen perusteella (Taulukko 4). Tässä käytettävät parametrit ja niiden luokittelun raja-arvot poikkeavat hieman vuoden 1990 alkuperäisestä esityksestä. Tässä luvussa esitetyt luokkien raja-arvot ovat diplomityön kohdeyrityksen käyttämiä. Muissa yhteyksissä voi esiintyä näistä poikkeavia arvoja.

**Taulukko 4. HRN-arvon merkitys (Metecno, 2022b).**

HRN	HRN = LO · FE · DPH · NP
0–1	Merkityksetön riski
2–5	Hyvin matala riski
6–10	Matala riski
11–50	Merkittävä riski
51–100	Korkea riski
101–500	Erittäin korkea riski
501–1000	Äärimmäinen riski
1000+	Mahdoton hyväksyä

Vaarojen luokitteluun käytettävät raja-arvot (Taulukko 4) tulisi valita tilanteeseen sopiviksi (Coulson, 2015). Metecnon käyttämässä riskin arvioinnin pohjassa riskiä pidetään hyväksyttävänä, kun  $HRN < 2$  (Metecno, 2022b). Esimerkiksi yhteistyörobotiikan sovelluksiin on esitetty, että HRN:n ollessa  $< 10$  riskiä voidaan pitää hyväksyttävänä (Hippert *et al.*, 2019). Raja-arvot ovat siis tilannekohtaisia ja riskejä sekä niiden pienentämistä tulee ajatella kokonaisvaltaisesti eikä keskittyä liikaa tiettyihin numeroarvoihin.

Ennen HRN-arvon määrittämistä jokaiselle muuttujalle valitaan riskin osatekijää parhaiten kuvaava parametri. Taulukossa 5 esitetään esiintymistodennäköisyyden arviointiin käytettävät arvot. Esiintymistodennäköisyyteen vaikuttaa henkilön altistuminen vaaralle, vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyys ja mahdollisuus välttää vahinkoa (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 22). Parametrissa LO huomioidaan näistä vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyys ja mahdollisuus vahingon välttämiseen. Vaaralle altistuminen käsitellään omassa parametrissaan FE.

**Taulukko 5. Riskin esiintymistodennäköisyys (Metecno, 2022b).**

LO	Esiintymistodennäköisyys
0.033	Mahdoton
1	Melkein mahdoton
1.5	Tuskin mahdollinen
2	Mahdollista
5	50–50
8	Todennäköistä
10	Erittäin todennäköistä
15	Varma

Vahingon esiintymistodennäköisyyteen vaikuttavista kolmesta muuttujasta vaaralle altistuminen käsitellään taulukon 6 avulla.

**Taulukko 6. Vaaralle altistumisen kesto (Metecno, 2022b).**

FE	Altistumisen kesto
0.5	Vuosittain
1	Kuukausittain
1.5	Viikoittain
2.5	Päivittäin
4	Tunneittain
5	Jatkuvasti

Vahingon suuruutta arvioitaessa voidaan huomioida mahdollisten terveyshaittojen vakavuus ja vahingon laajuus, eli vaaralle altistuvien henkilöiden lukumäärä (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 22). Terveyshaittojen vakavuus huomioidaan tässä menetelmässä muuttujan DPH avulla (Taulukko 7).

**Taulukko 7. Mahdollisen vamman vakavuusluokka (Metecno, 2022b).**

DPH	Vamman vakavuusluokka
0.1	Naarmu/ruhje
0.5	Repeytymä/viilto/muu lievä vahinko
1	Pienen luun murtuma (väliaikainen)
2	Suuren luun murtuma (pysyvä)
4	Yhden raajan/näön osittainen menettäminen, vakava loukkaantuminen (pysyvä)
8	Kahden raajan/näön täydellinen menettäminen, erittäin vakava loukkaantuminen (pysyvä)
15	Kuolema

Viimeinen huomioitava riskin arvioinnissa on vahingon laajuus, jota kuvataan muuttujalla NP. Tässä tutkimuksessa vaaralle altistuu korkeintaan 2 henkilöä, joten jokaisessa arvioitavassa tilanteessa NP on 1. Mikäli vaaralle altistuvia henkilöitä olisi enemmän, voitaisiin arvo valita taulukon 8 perusteella.

**Taulukko 8. Vaaralle altistuvien henkilöiden määrä (Metecno, 2022b).**

NP	Vaaralle altistuvat henkilöt
1	1–2 henkilöä
2	3–7 henkilöä
4	8–15 henkilöä
8	16–50 henkilöä
12	enemmän kuin 50 henkilöä

Hyviä puolia tässä menetelmässä on sen antama numeroarvo ja riskin tarkasteleminen useamman muuttujan avulla. Numeron perusteella voidaan kategorisoida eritasoisia riskejä ja kiinnittää huomiota merkittävimpiin riskeihin heti suunnittelun alussa. Riskien arvioinnin subjektiivisuudesta johtuen eri ihmiset arvioivat samalle vaaralle eri suuruisia riskejä, minkä vuoksi tärkeintä onkin keskittyä vaarojen tunnistamiseen ja riskien pienentämiseen (Coulson, 2015). HRN-menetelmässä riski jaetaan useaan muuttujaan, ja muuttujat taas useaan tasoon. Yhtä muuttujaa kerrallaan arvioitaessa on helpompi löytää oikeansuuntaisia arvoja kuin suoraan koko riskiä arvioimalla.

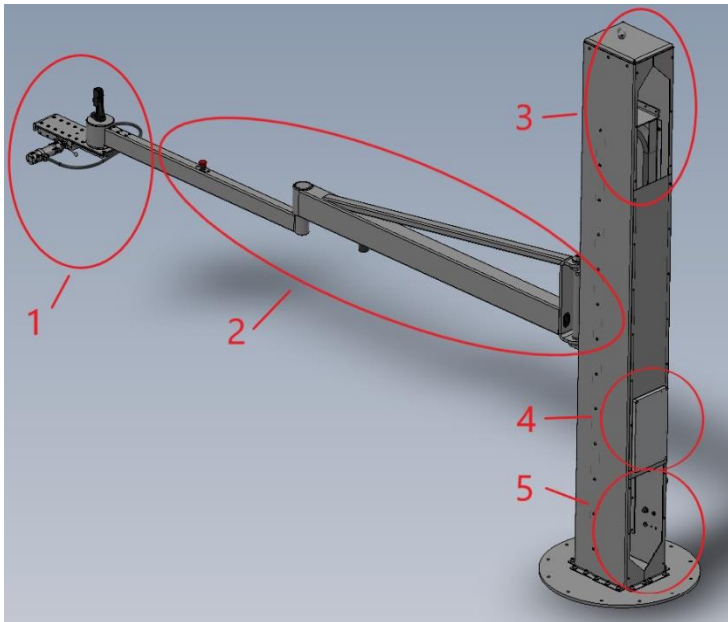
### **4.3 Nivelpuomikeventimen riskien arviointi**

Tämän työn riskin arviointi suoritetaan työryhmässä. Riskin suuruuden ja merkityksen arvioinnissa käytetään HRN eli Hazard Rating Number menetelmää. HRN on yksi numeerisen arvioinnin menetelmistä. Työryhmässä on mukana mekaniikkasuunnittelija ja sähkösuunnittelija, jotta koneen eri osa-alueisiin liittyvistä vaaroista saadaan kattava näkemys. Lisäksi projektipäällikkö osallistuu riskien arviointiin ja antaa pidemmän kokemuksen tuomaa näkemystä arvioinnin tueksi. Tässä luvussa ei esitetä kaikkia riskien arvioinnin yksityiskohtia, kuten lisälaitteen riskejä, vaan keskitytään olennaisimpiin seikkoihin ja annetaan esimerkkejä eri elinkaaren vaiheisiin ja työtehtäviin liittyvistä riskeistä. Riskin arviointi suoritetaan aluksi konseptimallin perusteella, jotta saadaan alustava listaus koneessa olevista riskeistä. Tämän jälkeen kone suunnitellaan turvalliseksi ja lopuksi varmistutaan, että jäännösriskit ovat hyväksyttävällä tasolla.

#### **4.3.1 Koneen raja-arvot**

Riskien arviointi aloitetaan määrittämällä koneen vaaravyöhykkeet ja raja-arvot. Nämä toimivat lähtötietoina vaarojen tunnistamiselle. Koneen vaaravyöhykkeitä (Kuva 11) ovat seuraavat:

- käyttöpaikka (1)
- puomin ympäristö (2)
- tolpan ylempi huoltoluukku (3)
- pääkeskus (4)
- tolpan alempi huoltoluukku (5)
- koneen välitön ympäristö (koko kone).



**Kuva 11. Nivelpuomikeventimen vaaravyöhykkeet.**

Nivelpuomikeventimen käyttöympäristö on teollisuushalli, jossa on lähtökohtaisesti normaali sisäilma eikä kone altistu esimerkiksi suurille lämpötilan vaihteluille. Koneen käyttämiseen tarvitaan puoliympyrän muotoinen alue, jonka säde on 3,3 metriä. Lisäksi kone tarvitsee tolpan kohdalla kolme metriä ja muualla kaksi metriä tilaa korkeussuunnassa. Konetta käyttävät teollisuuden työntekijät eikä sitä ole tarkoitettu kuluttajien käytettäväksi. Kevennin on tarkoitettu kiinteiden teräskappaleiden käsittelyyn, joiden suurin sallittu massa on 60 kilogrammaa. Laitetta ei ole tarkoitettu hauraiden, öljyisten tai vaarallisten materiaalien nostamiseen.

Koneen energianlähteitä ovat sähkö, paineilma ja potentiaalienergia. Potentiaalienergiaa on koneen puomissa ja nostettavissa kappaleissa. Etenkin potentiaalienergia aiheuttaa vakavia vaaroja nostolaitteissa, joten siihen liittyviä vaaroja täytyy käsitellä erityisen huolellisesti. Konetta käytetään puomin päästä ohjaussauvasta ohjaamalla. Käyttäjä voi liikuttaa taakkaa ylös ja alas moottoroidun nostoliikkeen ansiosta. Sivuttaissuunnassa nivellettyä puomia liikuttamalla saadaan siirrettyä taakkaa. Huoltotöiden ja vianetsinnän aikana huoltohenkilöt työskentelevät koneen tolpan ympäristössä.

Koneen elinkaaren vaiheita ovat kokoonpano ja testaus, kuljetus, asennus, käyttö, kunnossapito, vianetsintä ja käytöstä poistaminen. Kone suunnitellaan alle 20 000 syklin käyttöä varten, mikä vastaa noin kymmenen vuoden käyttöä suunnitellulla käytötavalla. Turvallisen käytön varmistamiseksi vaaditaan huoltotoimenpiteitä. Käyttäjän on määräajoin voideltava koneen ketjut ja johdekelkat sekä tarkkailtava ketjujen kuntoa.

Koneen raja-arvojen kattava määrittely helpottaa riskien arvioinnin seuraavaa vaihetta eli vaarojen tunnistamista. Kun on selvästi rajattu missä tilanteissa ja miten konetta tullaan käyttämään, on huomattavasti selkeämpää etsiä näistä tilanteista vaaroja. Jo raja-arvoja kirjatessa huomataan useita tilanteita, joissa koneen käyttäjä altistuu vaaroille.

### 4.3.2 Vaarojen tunnistaminen ja riskien suuruuden arviointi

Vaarojen tunnistamisessa edetään koneen elinkaaren mukaisesti. Koneen raja-arvojen perusteella tiedetään käsiteltävät elinkaaren vaiheet ja niihin liittyvät työtehtävät. Työtehtäviin liittyvät vaarat on tunnistettu ja kerätty alla oleviin taulukoihin. Taulukoissa 9–12 käsitellään vaaroihin liittyviä asioita ja yksittäisellä vaaralla on sama viitenumero jokaisessa taulukossa. Taulukossa 9 kuvataan vaara ja vaaratilanne. Tässä luvussa esitetään vain otteita koneen varsinaisesta riskin arvioinnista, joka on merkittävästi laajempi.

**Taulukko 9. Mahdollisesti esiintyvät onnettomuustilanteet.**

Viite nro	Vaara	Vaaratilanne
1	Puristuminen	Virhe koneen toimintalogiikassa
2	Puristuminen, joka aiheutuu kaatuvasta koneesta	Koneen kaatuminen kuljetuksen yhteydessä
3	Puristuminen, joka aiheutuu kaatuvasta koneesta	Oleskelu koneen lähellä siirron aikana
4	Puristuminen, joka aiheutuu kaatuvasta koneesta	Koneen kaatuminen lattiaan pulttauksen yhteydessä
5	Puristuminen, joka aiheutuu laskeutuvasta puomista	Raajan jääminen alle puomia laskettaessa
6	Voimakas isku, joka aiheutuu tippuvasta kappaleesta	Kappaleen liikuttaminen ja vahingollinen avauspainikkeen painaminen
7	Puristuminen, joka aiheutuu puomin odottamattomasta liikkeestä	Koneen liikkeiden yllättävä pysäytyskohdan ylitys ohjausjärjestelmän komponentin vikaantumisen takia.
8	Puristuminen, joka aiheutuu puomin odottamattomasta liikkeestä	Koneen liikkeiden yllättävä käynnistyminen hätäseispainikkeen vapauttamisen jälkeen
9	Puristuminen	Ketjun liike kireyden säädön yhteydessä.
10	Sähköisku jännitteisistä osista	Koskeminen jännitteisiin osiin

Taulukossa 10 esitetään, mihin elinkaaren vaiheeseen, työtehtävään ja vaaravyöhykkeeseen kyseiset vaarat liittyvät. Vaarojen huolellinen tunnistaminen helpottaa riskin suuruuden arviointia.

**Taulukko 10. Vaaroihin liittyvät olosuhteet.**

Viite nro	Elinkaaren vaihe	Tehtävä	Vaaravyöhyke (Kuva 11)
1	Testaus Metecnon ti-loissa	Testaus	Koneen välitön ympäristö
2	Kuljetus	Koneen kuljetus	Koneen välitön ympäristö
3	Kuljetus	Koneen siirto	Koneen välitön ympäristö
4	Asennus	Koneen asennus lattiaan	Koneen välitön ympäristö
5	Käyttö	Kappaleen siirtäminen	1 (Käyttöpaikka)
6	Käyttö	Kappaleen siirtäminen	1 (Käyttöpaikka)
7	Käyttö	Kaikki käytön aikaiset tehtävät	1,2 (Käyttöpaikka ja puomin ympäristö)
8	Käyttö	Koneen käynnistäminen	Koneen välitön ympäristö
9	Kunnossapito	Ketjujen kiristäminen	5 (Tolppa)
10	Vianetsintä/Kunnossapito	Vianetsintä tai huolto-tehtävät sähkökotelossa	4 (Sähkökotelot)

Lopulta voidaan arvioida riskien suuruus HRN-työkalun avulla. Yksi merkittävimmistä vaaroista on putoavan kappaleen aiheuttama voimakas isku (viite nro 6). On hyvin todennäköistä, että ihminen painaa vahingossa tarttujan avauspainiketta kesken noston, jolloin taakka pääsee putoamaan. Esiintymistodennäköisyys LO saa arvon 10. Konetta ei kuitenkaan käytetä jatkuvasti, vaan muutaman kerran päivässä, jolloin FE saa arvon 2,5. Taakan putoaminen ihmisen jalan päälle aiheuttaa vakavan loukkaantumisen, joten DPH-arvo on 4. Vaaralle altistuu ainoastaan koneen käyttäjä, joten NP on 1. Nämä arvot kertomalla saadaan riskin suuruudeksi  $HRN = 10 \cdot 2,5 \cdot 4 \cdot 1 = 100$ . Tämä on taulukon 4 perusteella korkea riski, joten merkittäviä toimenpiteitä riskin pienentämiseksi tarvitaan. Loput riskit arvioidaan samalla tavalla. Alustavan arvion mukaiset riskien suuruudet esitetään taulukossa 11.

**Taulukko 11. Riskien suuruuden arviointi.**

Viite nro	LO	FE	DPH	NP	HRN	Merkitys
1	2	0.5	4	1	4	Hyvin matala riski
2	2	0.5	8	1	8	Matala riski
3	2	0.5	8	1	8	Matala riski
4	2	0.5	8	1	8	Matala riski
5	2	2.5	4	1	20	Merkittävä riski
6	10	2.5	4	1	100	Korkea riski
7	1.5	2.5	2	1	7.5	Matala riski
8	1.5	1.5	4	1	9	Matala riski

9	2	0.5	2	1	2	Hyvin matala riski
10	1	1	8	1	8	Matala riski

Taulukko voidaan vielä järjestellä siten, että merkittävimmät riskit tulevat taulukon yläosaan. Suurimmissa riskeissä olisi hyvä päästä käyttämään suunnittelun keinoja, joilla vaarat voitaisiin poistaa koneesta kokonaan tai saataisiin aikaan merkittävä riskin piene-  
neminen. Jos riskejä on listattuna useita kymmeniä tai satoja, tällainen priorisoitu listaus auttaa suunnittelijoita hahmottamaan kokonaistilanneetta paremmin. Pieniä riskejä ei kuitenkaan saa jättää huomiotta, koska niihin saattaa löytyä yksinkertaisia ratkaisuja, joilla koko vaara poistetaan.

**Taulukko 12. Alustavan riskien arvioinnin tulokset.**

Viite nro	LO	FE	DPH	NP	HRN	Merkitys
6	10	2.5	4	1	100	Korkea riski
5	2	2.5	4	1	20	Merkittävä riski
8	1.5	1.5	4	1	9	Matala riski
2	2	0.5	8	1	8	Matala riski
3	2	0.5	8	1	8	Matala riski
4	2	0.5	8	1	8	Matala riski
10	1	1	8	1	8	Matala riski
7	1.5	2.5	2	1	8	Matala riski
1	2	0.5	4	1	4	Hyvin matala riski
9	2	0.5	2	1	2	Hyvin matala riski

Suunnitteluratkaisuja näiden riskien pienentämiseksi on esitetty luvussa viisi. Riskin arvioinnin suorittaminen koneen suunnittelun alkuvaiheessa on tärkeää, jotta saadaan käsitys koneen riskeistä. Tämän jälkeen suunnittelussa on helpompi systemaattisesti pienentää tunnistettuja riskejä.

### 4.3.3 Jäännösriskit

Viidennen luvun suunnitteluratkaisujen jälkeen riskien suuruudet arvioidaan uudestaan. Tämän arvioinnin tulokset on esitetty taulukossa 13. Esimerkiksi alussa korkean riskin vaara (viite nro 6) käyttäjän virheellisestä napin painalluksesta johtuen on saatu lasket-  
tua riittävän matalalle tasolle. Turvatoiminnon avulla käyttäjällä ei ole minkäänlaista mah-  
dollisuutta avata tarttujaa kesken noston. Arvioinnin päätteeksi kirjataan vielä jäännös-  
riskit (Taulukko 13).

**Taulukko 13. Koneen lopullinen riskien arviointi ja jäännösriskit.**

Viite nro	LO	FE	DPH	NP	HRN	Merkitys	Jäännösriski
1	2	0.5	0.5	1	0.5	Merkityksetön riski	Testaajan huolimattomuus.
2	1	0.5	8	1	4	Hyvin matala riski	Kuorman huolimaton käsittely.
3	0.03	0.5	8	1	0.13	Merkityksetön riski	Ohjeiden laiminlyönti, jolloin laitteen lähellä oleville henkilöille aiheutuu vaara.
4	0.03	0.5	8	1	0.13	Merkityksetön riski	
5	0.03	2.5	1	1	0.08	Merkityksetön riski	
6	0.03	2.5	4	1	0.33	Merkityksetön riski	
7	1.5	2.5	0.1	1	0.38	Merkityksetön riski	Koneen väärinkäyttö. Sormien asettaminen vaaralliseen paikkaan (kappaleen alle tai tarttujan päälle) lähestyttäessä kiinteää pintaa.
8	1	1.5	0.1	1	0.15	Merkityksetön riski	Komponenttien vikaantuminen. Kuittaaminen tapahtuu tolpan luona, joten käyttäjä ei ole vaarassa, vaikka kuittauksen jälkeen vikaantunut komponentti aiheuttaisi liikettä.
9	1	0.5	0.1	1	0.05	Merkityksetön riski	
10	1	1	8	1	8	Matala riski	Tahallinen väärinkäyttö, kokematon käyttäjä avaa itse sähkökeskuksen.

Suurimmat jäännösriskit liittyvät uuden koneen kuljetuksen aikaiseen käsittelyyn ja sähköturvallisuuteen. Koneiden sähkökeskusten riskit ovat teollisuudessa yleisesti tiedossa, ja koneen ostaja on velvollinen perehdyttämään työntekijät turvalliseen käyttöön. Valmistaja varmistaa, että sähkökeskus on rakennettu sille asetettujen vaatimusten mukaisesti. Käyttäjää on varoitettava koneeseen liittyvistä jäännösriskeistä. Luvussa 6 kerrotaan tarkemmin koneen markkinoille saattamisen vaatimuksista ja jäännösriskien huomioimisesta.

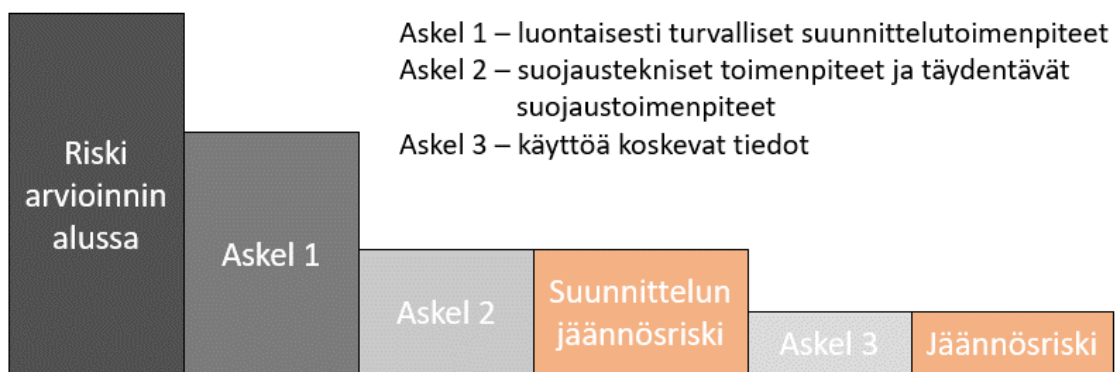


## 5. SUUNNITTELURATKAISUT

Tämän luvun alussa (alaluku 5.1) kuvataan strategia, jota käytetään koneen riskien pienentämiseen. Tämän jälkeen esitetään strategian mukaisia suunnitteluratkaisuja, joilla poistetaan tai pienennetään alkuperäisessä riskin arvioinnissa tunnistettuja riskejä. Luvun lopussa kuvataan koneelle ja sen osakokonaisuuksille suoritettavia kokeita, joiden avulla todennetaan suunnitteluratkaisujen vaatimustenmukaisuus. Testaaminen on tärkeää, jotta nähdään kuinka tehdyt suunnitelmat vastaavat todellista tilannetta. Suunnitteluratkaisujen jälkeiset jäännösriskit arvioidaan luvussa 4.3.3.

### 5.1 Riskien pienentäminen

Riskin arvioinnin tulosten perusteella valitaan sopivat ja riittävät toimet riskien pienentämiseksi, jota varten on määritetty kolmen askeleen menettelytapa (Kuva 12). Tarkoituksena on poistaa koneessa esiintyvät vaarat tai pienentää aiheutuvan vahingon vakaavuutta ja/tai vahingon esiintymistodennäköisyyttä (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 27). Tarkoituksena ei lähtökohtaisesti ole käyttää kaikkia askeleita, vaan ensisijainen tavoite on vaaran poistaminen koneesta luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä eli askeleen 1 avulla. Mikäli vaaran poistaminen on mahdollista, muita askeleita ei tarvitse käyttää eikä jäännösriskiä ole. Tämä ei kuitenkaan ole kovinkaan usein mahdollista, koska koneiden täytyy suorittaa niille annetut tehtävät. Koneiden suunnittelijoiden on hyvä huomioida, että tämä menettelytapa määritellään konedirektiivissä, joka on velvoittavaa lainsäädäntöä. Suunnittelussa on siis edettävä tämän periaatteen mukaan.



**Kuva 12. Riskien pienentämisen periaate perustuen lähteeseen (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 16).**

Ensimmäinen askel sisältää luontaisesti turvalliset suunnittelutoimenpiteet. Nämä toimenpiteet poistavat vaarat tai pienentävät vaaroihin liittyviä riskejä. Luontaisesti turvalliset suunnittelutoimenpiteet ovat ainoa mahdollisuus poistaa koneessa esiintyviä vaaroja, minkä vuoksi se on ensisijainen riskien pienentämisen keino. Nämä ratkaisut myös pysyvät todennäköisimmin vaikuttavina kaikissa tilanteissa. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 27–28) Riskien tunnistaminen suunnitteluprosessin alussa on hyvin oleellista turvallisen koneen suunnittelussa, koska muuten ensimmäisen askeleen hyödyntäminen turvallisuusratkaisuissa on hankalaa. Tutkimuksen koneen osalta yksi esimerkki luontaisesti turvallisesta suunnittelutoimenpiteestä on ratkaisu, jolla estetään puomin käyttäminen puristamiseen. Tähän liittyvät suunnitteluratkaisut esitetään tarkemmin alaluvussa 5.3.

Ensimmäisen askeleen toimilla voidaan esimerkiksi kasvattaa osien etäisyyksiä, jolloin poistetaan puristumis- tai leikkautumisvaaroja. Reunoja pyöristämällä voidaan välttää leikkautumisia ja pienentää törmäyksissä aiheutuvaa pintapainetta. Lisäksi voidaan varmistaa kunnollinen työasento ja hallintaelimiin ulottuminen. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 28)

Mikäli riski ei ole hyväksyttävällä tasolla ensimmäisen askeleen jälkeen, hyödynnetään suunnittelussa suojausteknisiä toimenpiteitä (askel 2). Henkilöiden suojaamisessa on käytettävä suojuksia ja turvalaitteita aina, kun luontaiset suunnittelutoimenpiteet eivät pienennä riskejä riittävästi. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 39) Toisen askeleen toimia tarvitaan käytännössä aina, koska koneilla suoritettaviin toimintoihin liittyy usein esimerkiksi suuria voimia tai nopeuksia, mitkä tekevät koneen liikkeistä vaarallisia. Näitä ominaisuuksia ei voida poistaa suunnitteluratkaisulla, joten käyttäjää on suojatta vaaroilta suojuksilla ja turvalaitteilla.

Toiseen askeleeseen liittyvät suojaustoimenpiteet voidaan jaotella kolmeen kategoriaan. Näistä ensimmäiseen eli ulkoisiin riskin pienentämisen toimenpiteisiin kuuluvat esimerkiksi aidat ja suojukset. Ohjausjärjestelmän turvatoiminnot ovat toinen kategoria. Näiden lisäksi voidaan käyttää täydentäviä suojausteknisiä toimenpiteitä. (Sundquist, 2019b, s. 30)

Tämän tutkimuksen koneeseen on suunniteltu esimerkiksi kiinteitä suojuksia. Nivelpuomikeventimen tolpan takaosassa on kiinteitä suojuksia, jotka estävät käyttäjän pääsyn vaaravyöhykkeelle (nostomekanismi). Suojukset on suunniteltu niitä koskevan standardin SFS-EN ISO 14120 mukaan. Suojusten lisäksi koneessa on turvatoimintoja, joi-

den tehtävänä on varmistaa käyttäjän turvallisuus tietyissä vaaratilanteissa. Näitä ratkaisuja kuvataan tarkemmin luvussa 5.5. Esimerkkeinä täydentävistä toimenpiteistä voidaan mainita hätäpysäytystoiminto ja paineilmajärjestelmän paineenpurkuventtiili.

Ensimmäisen ja toisen askeleen jälkeen tehtyjen toimenpiteiden riittävyyttä on arvioitava riskin arvioinnin perusteella iteratiivisesti. Riskin arvioinnissa selvitetään kunkin vaiheen jälkeen, ovatko tehdyt ratkaisut vähentäneet riskiä riittävästi. Jos riski ei ole hyväksyttävällä tasolla, on tehtävä lisää toimenpiteitä riskin pienentämiseksi. Myös suunnitteluratkaisujen pohjalta syntyneiden uusien vaarojen muodostamia riskejä on pienennettävä tämän menetelmän mukaisesti.

Viimeinen keino riskien pienentämiseen on askel 3, joka kattaa käyttöä koskevat tiedot eli käyttäjän ohjeistuksen. Kahden ensimmäisen askeleen jälkeiset jäännösriskit on yksilöitävä ja käyttäjää on varoitettava näistä riskeistä käyttöä koskevissa tiedoissa. Tiedoissa ohjeistetaan turvalliset työmenetelmät ja tarvittavien henkilösuojaimien käyttö. Käyttäjän on saatava tarpeelliset tiedot ja varoitukset kaikista koneeseen liittyvistä jäännösriskeistä. Mikäli käyttäjältä vaaditaan erityistä osaamista, täytyy koulutustarpeet kuvata riittävän yksityiskohtaisesti. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 27) Tutkimuksen koneen käyttöön liittyviä tietoja käsitellään tarkemmin kuudennessa luvussa.

Koneen dokumentaatioissa on huomioitava myös koneen odotettava väärinkäyttö ja siihen liittyvistä riskeistä on varoitettava. Suunnittelijoilla on useita mahdollisuuksia välittää tietoa käyttäjälle. Keinoja ovat itse koneeseen liitetyt tiedot, käyttöohjeissa olevat tiedot, merkinantolaitteet tai pakkauksen merkinnät. (SFS-EN ISO 12100, 2010, s. 51) Kunkin tilanteeseen ja jäännösrisktiin tulee valita niihin parhaiten soveltuvat keinot. Esimerkiksi nivelpuomikeventimessä on merkinantolaitteita varoittamassa paineilman syöttöhäiriöstä, mikä vaatii käyttäjältä suhteellisen nopeaa reagointia. Toisaalta osaa tiedoista tarvitaan korkeintaan muutaman kerran koneen elinkaaren aikana ja ne voidaan kuvata koneen mukana tulevassa dokumentaatioissa. Esimerkiksi koneen asennukseen liittyvät riskit kuvataan käyttöönotto-ohjeessa.

Kolmannen askeleen toimenpiteet vaikuttavat vain, jos käyttäjä toteuttaa ne suunnittelijan ohjeistuksen mukaisesti. Suunnittelijan ohjeiden seuraamisen lisäksi käyttäjän vastuulla on valvonta, turvallisten työmenetelmien ja henkilösuojainten käyttö sekä koulutuksen järjestäminen. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 16) Vastuu koneen turvallisuudesta kuuluu siis valmistajan lisäksi myös osittain koneen ostajille ja käyttäjille.

Käyttöä koskevista tiedoista on hyvä huomioida, että niillä ei voida korvata luontaisesti turvallisia suunnittelutoimenpiteitä tai suojausteknisiä toimenpiteitä (SFS-EN ISO 12100,

2010, s. 27). Käyttöä koskeviin tietoihin ei voida luottaa merkittävien riskien pienentämisessä, koska käyttäjän on helppoa toimia annettujen ohjeiden vastaisesti. Edellä kuvattujen (askel 1 ja askel 2) toimenpiteiden tarkoitus on estää koneen vaarallinen käyttö ja varmistaa käyttäjän turvalliset työmenetelmät. Ohjeiden tarkoituksena on puolestaan lisätä käyttäjän tietoisuutta koneeseen liittyvistä jäännösriskeistä ja täten ohjata koneen turvalliseen käyttöön.

## 5.2 Tarttujan (kuormanpitolaite) turvallisuus

Koneen energiansyötön vikaantuminen on merkittävä riski, koska se tapahtuu todennäköisesti useita kertoja koneen käyttöänsä aikana. Tämä on huomioitava tarttujan suunnittelussa, jotta nostettava taakka ei pääse putoamaan energiansyötön vikaantuessa.

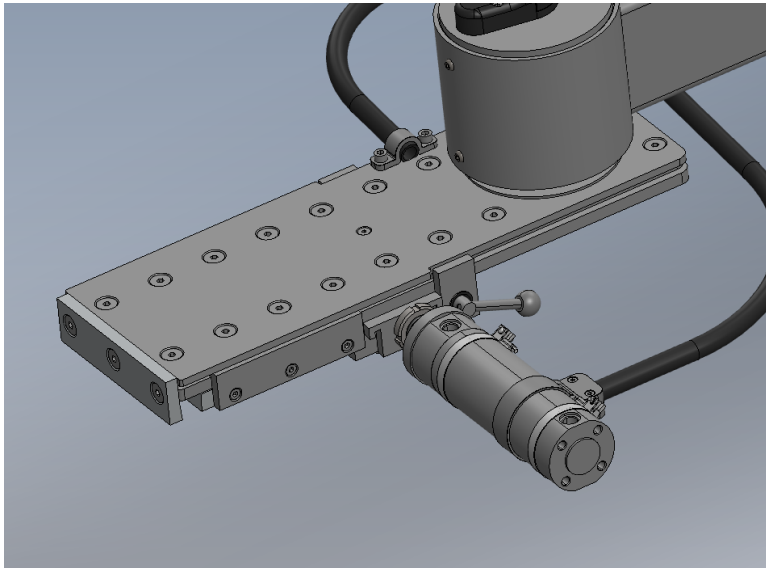
Ensimmäinen vaihtoehto tarttujaksi on kestopagneetit. Kestomagneetit tarvitsevat energiaa vain tilansa muuttamiseen, minkä vuoksi ne ovat turvallinen vaihtoehto varauduttaessa energiansyötön häiriöihin. Kone on tarkoitettu kappaleiden nostamiseen hyllystä, eli kappaleiden yläpuolella on rajallisesti tilaa. Magneettien on tartuttava kappaleeseen sivusta, mikä lisää merkittävästi tartuntaan vaadittavaa voimaa. Kappaleen nostamiseen tarvittava voima  $F_{vaadittu}$  muodostuu kitkasta. Oletetaan magneettien ja teräskappaleiden väliseksi kitkakertoimeksi  $\mu = 0,15$ . Luvun 3.2.1 perusteella käytetään varmuuskerrointa ( $n_{varmuus}$ ) 3. Suurin sallittu nostettava kuorma (WLL) on 60 kilogrammaa. Putoamiskiihtyvyyden  $g$  arvo on  $9,81 \frac{m}{s^2}$ .

$$F_{vaadittu} = \frac{n_{varmuus} \cdot WLL \cdot g}{\mu} = \frac{3 \cdot 60 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{0,15} = 11\,772 \text{ N} \approx 11,8 \text{ kN}$$

Markkinoilta ei löytynyt vaatimuksia vastaavia magneetteja, joten suunnittelussa edetään toisen idean perusteella. Jos tartuttavissa kappaleissa olisi enemmän pinta-alaa, magneettien käyttäminen onnistuisi. Ylhäältä tartuttaessa riittäisi pienempi voima ja magneetti, koska tartuntaan käytetään siinä tapauksessa suoraan magneettista voimaa kitkavoiman sijaan.

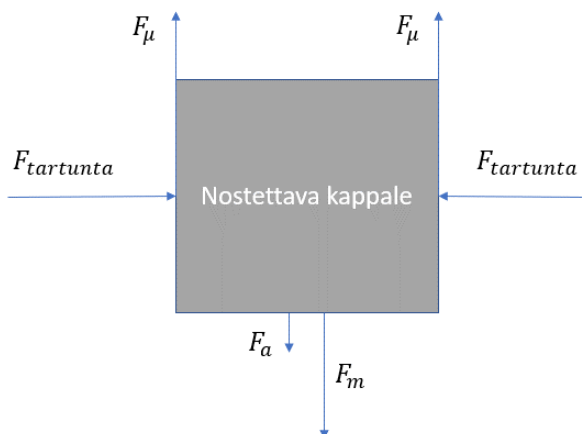
Tarttujaksi suunnitellaan mekaaninen puristin, jossa paineilmasylinterin voimaa kasvatetaan kiilamekanismin avulla (Kuva 13). Kiilamekanismi myös estää tarttujan avautumisen energiansyötön häiriötilanteissa. Tarttujassa on karkea esisäätö (lukitusvipu), jolla leukojen etäisyyttä voidaan säätää välillä 15–200 millimetriä. Sylinteri tuottaa kiiloilla ly-

hyen viiden millimetrin liikkeen, jolla muodostetaan riittävä voima kappaleen nostamiseksi. Tarttujan rakenne on matala, minkä ansiosta sillä voidaan tarttua kappaleeseen ylhäältä päin myös hyllyssä.



**Kuva 13. Nivelpuomikeventimen tarttuja.**

Tartunnassa puristavien leukojen kitka pitää kappaleen tarttujassa kiinni (Kuva 14). Molemmat leuat toimivat kitkapintoina, jolloin ylöspäin vaikuttavia voimia  $F_{\mu}$  on kaksi kappaletta. Tarttujan laskennassa edetään tarvittavasta nostovoimasta  $F_{tartunta}$  kohti mekanismin alkua ja lopuksi määritetään nostamiseen tarvittava minimipaine sylinterillä.



**Kuva 14. Tartunnan vapaakappalekuva.**

Vapaakappalekuvan perusteella voidaan määrittää tasapainoyhtälö (1), josta ratkaistaan tartuntaan vaadittava voima  $F_{tartunta}$  (2). Arvioidaan, että suurin alaspäin aiheutuva kiihtyvyys ( $a$ ) puomin nopeuden muutoksesta johtuen on  $1 \text{ m/s}^2$  ja siitä aiheutuu voima  $F_a$ .

Kitkavoiman kasvattamiseksi valitaan leukojen materiaaliksi alumiini. Alumiinin ja teräksen välillä on suurempi lepokitkakerroin kuin kahden teräspinnan välillä. Käytetään kitkakerrointa  $\mu = 0.2$ .

$$y: F_{\mu} + F_{\mu} - F_m - F_a = 2 \cdot \mu \cdot F_{tartunta} - WLL \cdot g - WLL \cdot a = 0 \quad (1)$$

$$F_{tartunta} = \frac{WLL \cdot g + WLL \cdot a}{2 \cdot \mu} = \frac{60 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 60 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2 \cdot 0,2} = 1621,5 \text{ N} \quad (2)$$

Tarttujalla on saatava aikaan kaksinkertainen ( $n_{varmuus} = 2$ ) voima verrattuna taakan nostamiseen tarvittavaan voimaan (SFS-EN 14238, 2005, s. 14). Lasketaan seuraavaksi tarttujalta vaadittava voima  $F_{turva}$ .

$$F_{turva} = n_{varmuus} \cdot F_{tartunta} = 2 \cdot 1621,5 \text{ N} = 3243 \text{ N}$$

Kiiloilta vaaditaan voiman  $F_{turva}$  lisäksi tarpeeksi voimaa, jotta liikkuvan leuan johteissa olevat kitkavoimat eivät vähennä tartunnan voimaa. Arvioidaan johteissa olevan kitkan ( $F_{\mu, johde}$ ) suuruudeksi 200 N. Ratkaistaan yhtälöstä (3) kiilan tuottama voima  $F_2$ . Tarttujan muodostama tartuntavoima saadaan aikaan kahdella kiilalla, joten  $F_2$  huomioidaan yhtälössä kaksi kertaa. Voiman  $F_2$  y-suuntainen komponentti on kappaleen lukitsemiseen käytettävä voima ja se saadaan laskettua kiilakulman  $\alpha$  avulla.

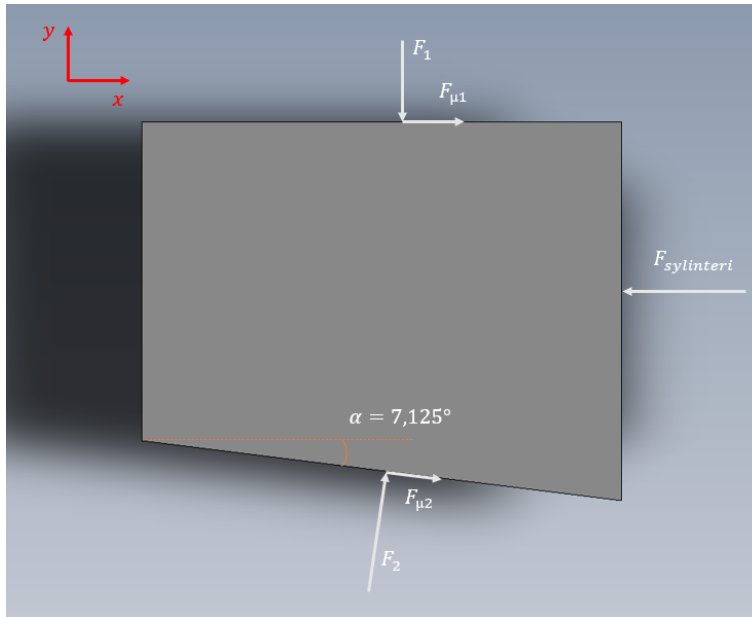
$$2 \cdot F_{2,y} - F_{turva} - F_{\mu, johde} = 0 \quad (3)$$

$$2 \cdot F_2 \cdot \cos(\alpha) - F_{turva} - F_{\mu, johde} = 0$$

$$2 \cdot F_2 \cdot \cos(7,125^\circ) - 3243 \text{ N} - 200 \text{ N} = 0$$

$$F_2 = 1734,9 \text{ N}$$

Nostamiseen käytettävä voima luodaan kiilojen avulla (Kuva 15). Sylinteri työntää kiilaa voimalla  $F_{sylinteri}$ , jolloin muodostuu tukipinnasta voima  $F_1$  ja tartunnan aikaansaava voima  $F_2$ . Kiila on mitoitettu suhteella 1:8, joka asteina ilmaistuna on  $\tan^{-1}(\frac{1}{8}) = 7,125^\circ$ . Seuraavaksi määritetään kiilojen lukitsemiseen vaadittava voima  $F_{sylinteri}$ . Tilanteessa kitkavoimia on kaksi kappaletta ( $F_{\mu 1}$  ja  $F_{\mu 2}$ ).



**Kuva 15. Tarttujan kiilan vapaakappalekuva.**

Vapaakappalekuvasta voidaan muodostaa yhtälöt 4 ja 5, joista ratkaisemalla saadaan sylinterin tuottama voima. Kaikilla kitkapinnoilla on teräs-teräs kosketus, jonka kitkakerroin ( $\mu$ ) on 0,15.

$$\text{x-suunta: } F_{\mu 1} + F_{2,x} + F_{\mu 2,x} - F_{\text{syylinteri}} = 0$$

$$F_1 \cdot \mu + \sin(\alpha) \cdot F_2 + \cos(\alpha) \cdot F_2 \cdot \mu - F_{\text{syylinteri}} = 0$$

$$F_1 \cdot 0,15 + \sin(7,125^\circ) \cdot 1734,9 \text{ N} + \cos(7,125^\circ) \cdot 1734,9 \text{ N} \cdot 0,15 - F_{\text{syylinteri}} = 0 \quad (4)$$

$$\text{y-suunta: } F_{2,y} - F_{\mu 2,y} - F_1 = 0$$

$$\cos(\alpha) \cdot F_2 - \sin(\alpha) \cdot F_2 \cdot \mu - F_1 = 0$$

$$\cos(7,125^\circ) \cdot F_2 - \sin(7,125^\circ) \cdot 1734,9 \text{ N} \cdot 0,15 - F_1 = 0 \quad (5)$$

$$\rightarrow F_1 = 1695,68 \text{ N ja } F_{\text{syylinteri}} = 625,249 \text{ N}$$

Tartuntavoima saadaan aikaan paineilmasylinterillä, joka liikuttaa kiilamekanismia. Arvioidaan seuraavaksi sylinterissä tapahtuvia häviöitä, jotta saadaan laskettua vaadittava tartuntapaine. Kitkojen arvioinnin ei ole tarkoitus olla tässä yhteydessä täydellinen, vaan tarkoituksena on varmistua sylinterin riittävästä koosta ja arvioida tarvittavaa painetta kappaleen turvalliseen nostamiseen. Kokoonpanon jälkeisillä koejärjestelyillä testataan

toteutunut tartuntavoima, jotta paineraja voidaan säätää lopulliseen arvoonsa. Arvioidaan sylinterissä olevan kitkan  $F_{\mu,tiivisteet}$  suuruudeksi 100 N, kitkan suuruusluokka on arvioitu lähteen perusteella (Azzi *et al.*, 2019).

Seuraavaksi määritetään sylinteriltä vaadittava paine  $p_{tartunta}$ . Käytettävässä sylinteri voimaa tuottava pinta-ala  $A_{syl}$  on 1650 mm<sup>2</sup>.

$$p_{tartunta} = \frac{F_{sylinteri} + F_{\mu,tiivisteet}}{A_{syl}} = \frac{625,249 \text{ N} + 100 \text{ N}}{1650 \text{ mm}^2} = 0,439545 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \approx 0,44 \text{ MPa}$$

$$= 4,4 \text{ bar}$$

Toteutunutta tartuntapainetta valvotaan, jotta voidaan varmistua riittävästä voimasta ennen noston aloitusta. Näiden laskujen perusteella alustavasti minimipaine asetetaan 4,5 baariin. Laskelmien vastaavuus todelliseen tilanteeseen varmistetaan testaamalla, jolloin säädetään lopullinen minimipaineen arvo painerajoille. Mikäli paineensyöttöön tai paineilmajärjestelmään tulee häiriöitä kesken noston, niistä varoitetaan käyttäjää valomerkillä. Kappale ei ole vaarassa pudota energiansyötön häiriöistä huolimatta, koska kiilamekanismi estää avautumisen ilman avaavaa voimaa. Tämä voidaan perustella laskemalla kiilojen avaamiseen tarvittava voima yhtälöistä 6 ja 7. Yhtälöiden muodostamiseksi tilanne on kuvan 15 kaltainen, mutta  $F_{sylinteri}$  voiman sijaan on vastakkaiseen suuntaan voima  $F_{avaus}$  ja myös kitkavoimat ovat vastakkaiseen suuntaan.

$$x: F_{avaus} + F_{2,x} - F_{\mu 2,x} - F_{\mu 1} = 0$$

$$F_{avaus} + \sin(\alpha) \cdot F_2 - \cos(\alpha) \cdot F_2 \cdot \mu - F_1 \cdot \mu = 0$$

$$F_{avaus} + \sin(7,125^\circ) \cdot 1734,9 \text{ N} - \cos(7,125^\circ) \cdot 1734,9 \text{ N} \cdot 0,15 - F_1 \cdot 0,15 = 0 \quad (6)$$

$$y: F_{2,y} + F_{\mu 2,y} - F_1 = 0$$

$$\cos(\alpha) \cdot F_2 + \sin(\alpha) \cdot F_2 \cdot \mu - F_1 = 0$$

$$\cos(7,125^\circ) \cdot 1734,9 \text{ N} + \sin(7,125^\circ) \cdot 1734,9 \text{ N} \cdot 0,15 - F_1 = 0 \quad (7)$$

Yhtälöryhmästä saadaan voimalle  $F_{avaus}$  arvoksi 306,105 N, kun  $F_2$ :lle käytetään edellä laskettua puristusvoiman arvoa 1734,9 N. Kiilojen avaamiseen tarvitaan siis 300 newtonin voima. Tämä voima saadaan helposti aikaan sylinterillä, mutta sylinterin pitopaineen laskiessa kiila ei lähde itsestään aukeamaan.

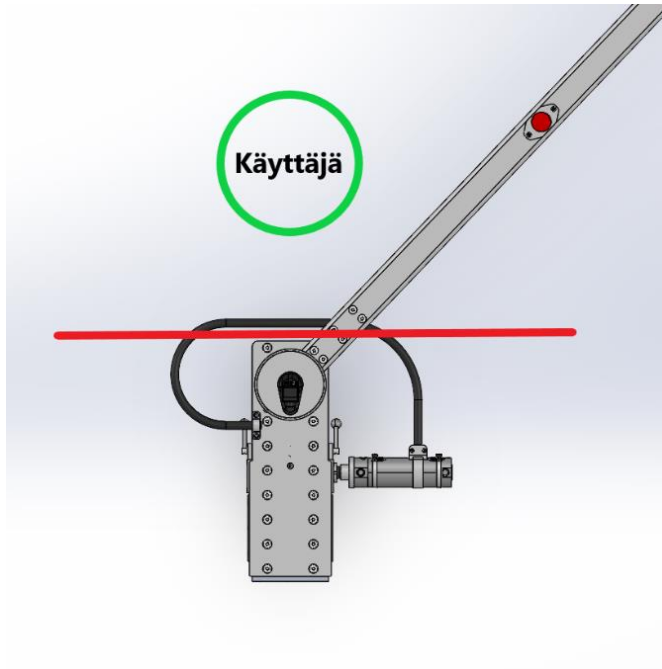


Lisäksi sylinterin painetta pidetään yllä letkurikkoventtiilin avulla. Letkurikkoventtiili tarvitsee avautuakseen pilottipaineen, joten paineen putoaminen ei vaikuta sylinterissä olevaan paineeseen. Paineen ylläpito on tärkeää turvallisuuden kannalta, koska tärinä saattaa löystyttää kiilojen lukitusta. Letkurikkoventtiili ylläpitää sylinterin tuottamaa voimaa, minkä vuoksi riski tarttujan avautumisesta on matala. Näiden turvatoimien tarkoitus on estää tarttujan tahaton avautuminen ja siten taakan tippuminen kesken nostoliikkeen.

Myös tarttujan esisäädölle on esitetty vaatimuksia. Kuormanpitolaitteen säädettävissä osissa on oltava tahattoman irtoamisen estäviä ominaisuuksia (SFS-EN 14238, 2005, s. 13). Esisäätö perustuu epäkeskomekanismiin, jonka tarkoitus on olla vaikeasti avattava puristusvoiman ollessa aktiivisena. Tämän vaatimuksen toteutuminen on testattava, jotta voidaan varmistua tarttujan turvallisuudesta. Käyttäjä ei saa joutua vaaratilanteeseen osuttuaan esimerkiksi vahingossa kädellä vipuun siirtäessään nostimen puomia toiseen asentoon.

Myös puristumisvaarat on huomioitu tarttujan suunnittelussa. Sylinteri liikkuu kiilan mukana kohti tarttujan runkoa, jolloin käyttäjän sormelle muodostuu puristumisvaara. Tämä vaara poistetaan muodostamalla noin 20 millimetrin rako sylinterin ja tarttujan rungon väliin. Useita ratkaisuja sormien puristumisen estämiseksi on toteutettu. Käyttäjä ei voi puristaa tarttujalla ennen kuin se on laskettu nostettavan kappaleen päälle. Tyhjänä tarttujan leukoihin ei saa puristettua 15 millimetriä pienempää väliä.

Jäännösriskinä tarttujan toiminnassa on lähinnä useampi samanaikainen vikaantuminen tai käyttäjän tarkoituksenmukainen väärinkäyttö. Näiden suunnitteluratkaisujen ja varotoimien lisäksi käyttäjän on pysyttävä kaikissa tilanteissa poissa taakan alta, minkä vuoksi tarttuja ja koneen ohjaaminen on suunniteltu siten, että käyttäjällä ei ole tarvetta mennä taakan alle missään tilanteessa (Kuva 16).



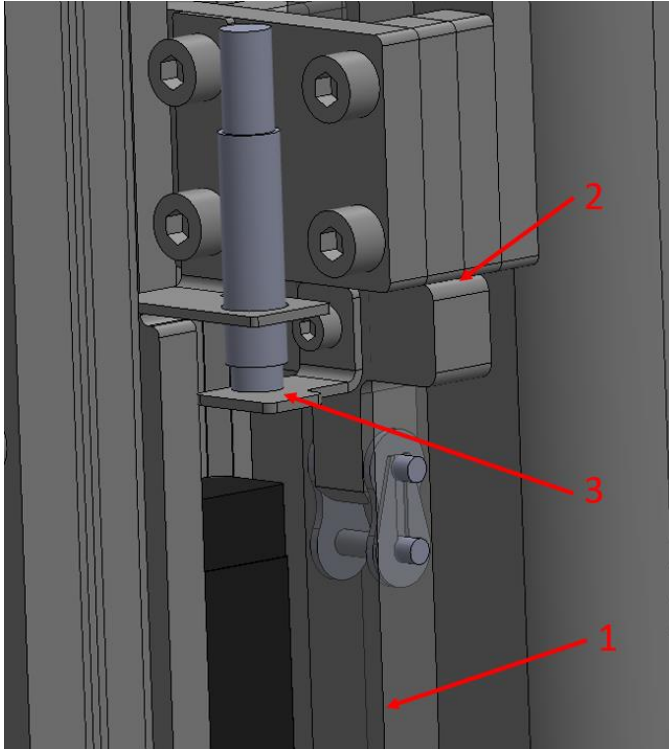
**Kuva 16. Koneen käyttöpaikka.**

Kuvasta 16 nähdään, että käyttäjän etäisyys nostettavasta taakasta on metrin luokkaa. Käyttäjä ei siis ole suoraan taakan alla, mikä mahdollistaa vahinkojen välttämisen vaaratilanteessa. Jokaisen nostolaitteella työskentelevän on kuitenkin hyvä huomioida nostettaviin taakkoihin liittyvät riskit.

### 5.3 Puristamisen estäminen

Riskien arvioinnin perusteella yksi merkittävimmistä koneeseen liittyvistä riskeistä on käyttäjän jääminen puristuksiin alaspäin liikkuvan puomin alle. Tämän riski poistetaan koneesta luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä (askel 1).

Nostoliike suoritetaan rullaketjulla (Kuva 17, kohta 1). Rullaketjulla on mahdollista toteuttaa pitkä nostoliike ja sen avulla saadaan suuri varmuuskerroin puomin kannatteluun. Yhtenä toteutusvaihtoehtona ollut trapetsikierretanko ei sovellu tähän käyttökohteeseen, sillä se alkaisi aikaisempien kokemusten perusteella värähtelemään tavoiteltavilla nopeuksilla. Rullaketjuun lisätään erillinen vetopala, jonka avulla puomia nostetaan. Laskusuunnassa vetopala irtoaa (Kuva 17, kohtaan 2 muodostuu rako) välittömästi puomista, mikäli puomi lasketaan jotain estettä päin. Tämä tekee puomilla puristamisen mahdottomaksi, joten alkuperäinen vaara poistuu.



**Kuva 17. Puomin nostoliikkeen toteutus.**

Suunnitteluratkaisu poistaa alkuperäisen vaaran kokonaan, mutta samalla syntyy uusi riski. Jos törmäystä ei havaita ja ketjun vetopala pääsee liikkumaan kauas puomista, on mahdollista, että puomi pääsee tippumaan vapaasti puristuksen vapautuessa. Tämän riskin pienentämiseksi käytetään ohjausjärjestelmää. Ohjausjärjestelmä havaitsee puomin irtoamisen vetopalasta (Kuva 17, kohta 3), minkä jälkeen laskuliike pysäytetään välittömästi.

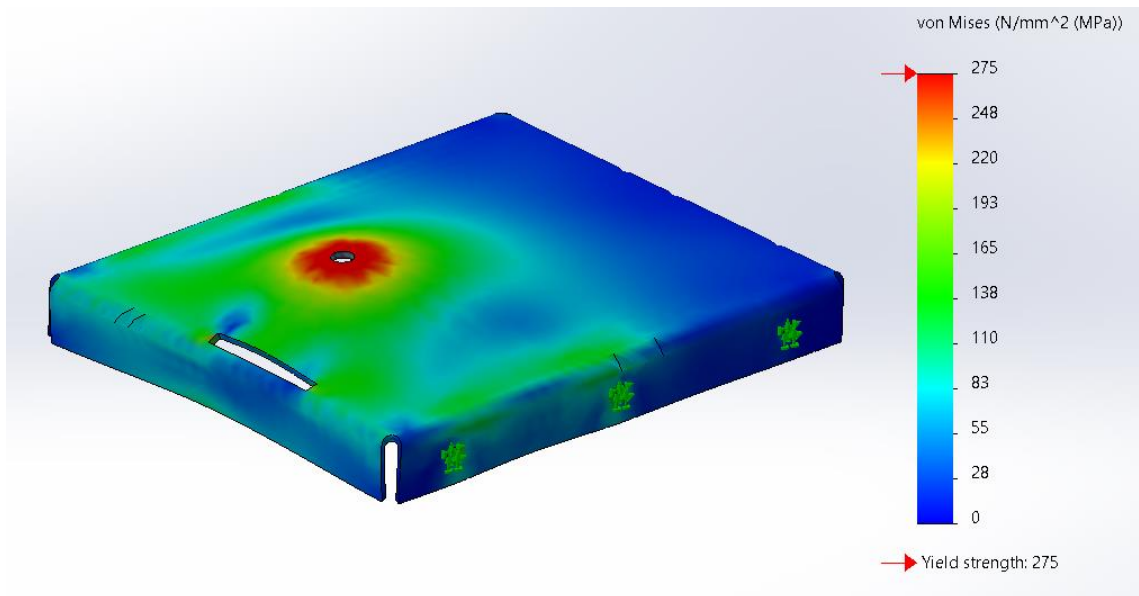
Tämä valvonta suoritetaan turvaluokitellulla anturilla, josta saadaan kahdennettu signaali. Signaali käsitellään turvareleellä, joka lopettaa laskuliikkeen anturin vaihtaessa tilaansa. Rakenne on turvatoiminnon luokan neljä mukainen. Jäännösriskinä on raajan jääminen puomin oman painon alle puristukseen. Tämän riskin pienentämiseksi todennäköisyyttä pienennetään poistamalla työalueelta esineet, jotka puomin kanssa voisivat muodostaa puristumisvaaran. Vahinkojen vakavuutta pienennetään ohjeistamalla käyttäjiä suojakäsineiden ja turvakenkien käytöstä.

## **5.4 Koneen nostaminen ja kiinnittäminen**

Kone voisi kaatuessaan aiheuttaa merkittäviä vahinkoja käyttäjille, joten riskin arvioinnissa tunnistettuihin vaaratilanteisiin on kehitettävä riskiä pienentäviä ratkaisuja. Kaatumiseen liittyviä vaaroja esiintyy niin koneen asennuksen kuin käytönkin aikana. Kone voi

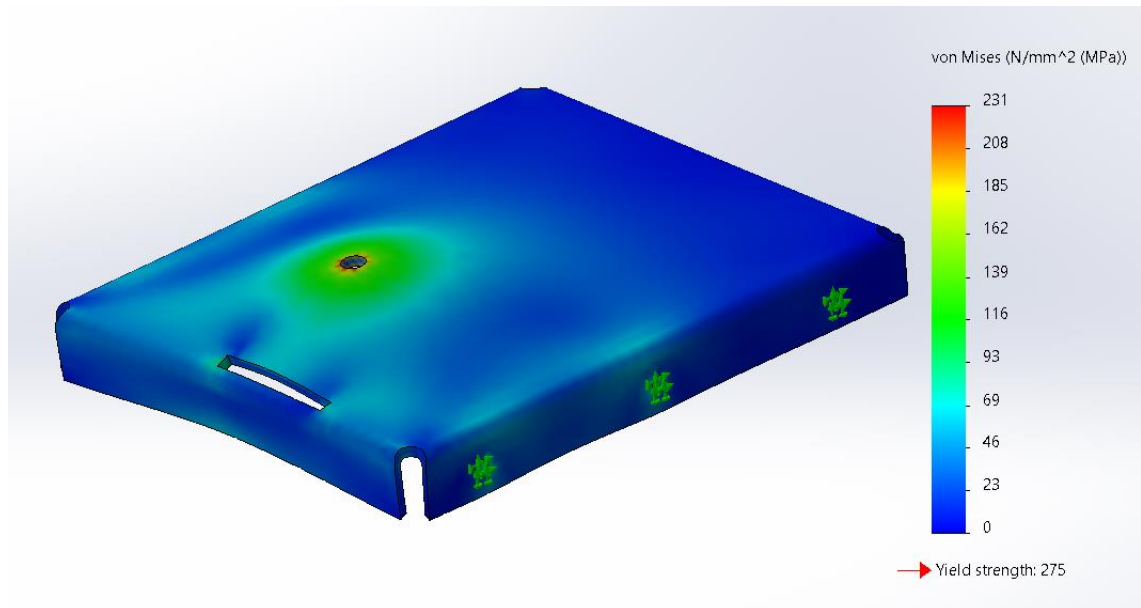
kaatua, kun sitä siirretään hallin sisällä tai asennuksen yhteydessä, minkä vuoksi on tärkeää suunnitteluratkaisuun poistaa nämä vaarat. Vaarojen poistamiseksi koneeseen suunnitellaan koneen painon kestävä nostolenkki. Nostolenkistä nostettaessa koneella ei ole mahdollisuutta kaatua.

Nostolenkki sijoitetaan nivelpuomikeventimen tolpan kattoon. Katon on kestävä nostossa aiheutuva kuormitus. Koneen kokonaismassa on noin 460 kilogrammaa. Koneen ulkokuoret on tehty neljän millimetrin vahvuisesta ohutlevystä, joten selvitetään ensin, voidaanko myös kattopelti tehdä samasta materiaalista (Kuva 18). Kuormittava voima 4512 N kohdistuu kattopellin sisäpintaan käytetyn aluslevyn kautta. Kattopellin sivussa olevat reiät toimivat kiinnityksinä.



**Kuva 18. Lujuuslaskennan tulokset kattopellille 4 mm ohutlevystä.**

FEM-analyysin perusteella huomataan, että 4 mm ohutlevy ei sovellu kattopellin materiaaliksi. Noston aikana kattoon muodostuisi pysyvää muodonmuutosta, mikä ei ole suunnittelukriteerien mukaan sallittua. Vaihtoehtoina on erillisen tukirakenteen suunnittelu tai ohutlevyn paksuntaminen. Kustannusten kannalta on järkevämpää paksuntaa kattopeltiä kuin suunnitella uusia osia. Kun levy vaihdetaan 6 mm paksuksi, se kestää asetetun kuormituksen ilman pysyviä muodonmuutoksia (Kuva 19). Ohutlevyn paksuudeksi valikoitui kuusi millimetriä, koska samaa materiaalia käytetään kuormanpitolaitteen osissa.

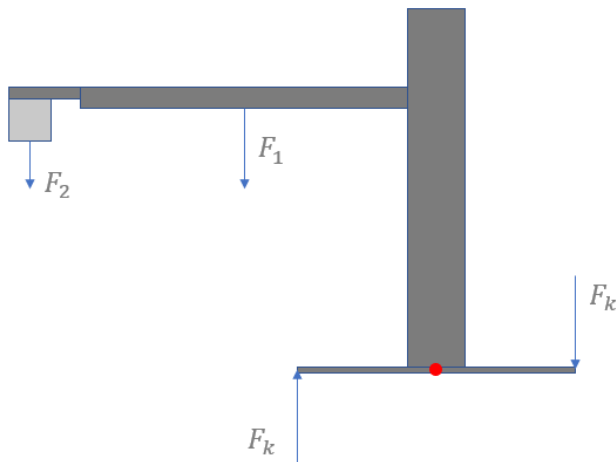


**Kuva 19. Lujuuslaskennan tulokset kattopellille 6 mm ohutlevystä.**

Nostolenkki kiinnitetään kattopeltiin mutterin avulla. Jotta nostolenkin liitos ei pääse aukeamaan, käytetään mutterin kiinnityksessä kierrelukitetta. Kiinnityksen pettäminen aiheuttaisi koneen tippumisen noston aikana.

Suunnitteluratkaisuista huolimatta koneeseen jää pieniä jäännösriskkejä, jotka on huomioitava. Nostovälineiden ja työtapojen on sovellettava koneen käsittelyyn. Käyttöohjeissa mainitaan koneen massa, jotta käyttäjän on helppo valita tilanteeseen sopivat nostovälineet. Asentajia neuvotaan myös turvallisiin työtapoihin. Koneen irrottaminen nosturista ennen kunnollista lattiaan kiinnitystä on kielletty.

Kone voi kaatua myös käytön aikana, jos lattiaan kiinnitys pettää. Nivelpuomikeventimessä on 3,3 metriä pitkä puomi, minkä vuoksi se on kiinnitettävä tukevasti lattiaan. Pitkän puomin muodostama vipuvarsi kasvattaa kiinnitykseltä vaadittua voimaa. Ilman kunnollista kiinnitystä, kone voisi kaatua käyttäjän päälle. Tarvittavan kiinnitysvoiman suuruus voidaan laskea kiinteän kappaleen statiikan avulla (Kuva 20). Tarkasteltavaksi valitaan kiinnityksen kannalta pahin mahdollinen kuormitustilanne. Tässä tilanteessa sekä puomi että tarttuja ovat suoriksi ojennettuina, jolloin nostettavan kappaleen etäisyys tolpastä on suurin mahdollinen.



**Kuva 20. Lattiaan kiinnityksen vapaakappalekuva.**

Ratkaistaan kiinnitysvoiman  $F_k$  suuruus momenttiyhtälön (8) avulla. Yhtälössä esiintyvä voima  $F_1$  kuvastaa puomin ja kuormanpitolaitteen painoa ja niiden painopiste on suoraksi ojennettuna 2,3 metrin päässä tolpan keskilinjasta. Voima  $F_2$  kuvaa nostettavan taakan painoa. Kiinnitysvoimien etäisyys 0,315 m on määritetty lähimpien reikien perusteella.

$$F_1 \cdot 2,3 \text{ m} + F_2 \cdot 4 \text{ m} - 2 \cdot F_k \cdot 0,315 \text{ m} = 0$$

$$880 \text{ N} \cdot 2,3 \text{ m} + 1177 \text{ N} \cdot 4 \text{ m} - 2 \cdot F_k \cdot 0,315 \text{ m} = 0 \quad (8)$$

$$F_k = 10685 \text{ N}$$

Koneen pohjalevyssä on 12 reikää. Oletetaan tässä, että kiinnitysvoima koostuu kolmesta kiinnityspisteestä ( $n_{\text{kiinnityspisteet}} = 3$ ). Määritetään pisteille myös varmuuskerroin ( $n_{\text{varmuus}}$ ) 2. Varmuuskerroin varmistaa, että kone ei kaadu myöskään ylikuormitettuna. Lasketaan yksittäiseltä kiinnityspisteeltä vaadittava voima  $F_{\text{piste}}$ .

$$F_{\text{piste}} = \frac{n_{\text{varmuus}} \cdot F_k}{n_{\text{kiinnityspisteet}}} = \frac{2 \cdot 10685 \text{ N}}{3} = 7100 \text{ N}$$

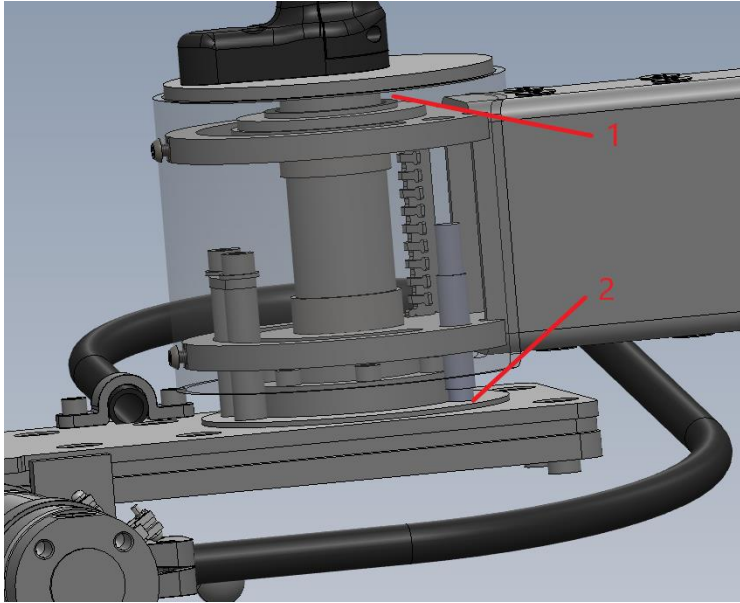
Tästä muodostuu vaatimus koneen asennukseen. Kone on asennettava siten, että jokainen kiinnityspiste kehällä kestää 7,1 kN voiman. Asentajalle jää vapaus valita haluamansa kiinnitystarvikkeet, kunhan vaatimus kiinnitysvoimista täyttyy. Lattiaan kiinnityksen ohjeistaminen on keskeistä sisältöä koneen käyttöönotto-ohjeissa. Jäännösriskiksi jää ohjeiden noudattamatta jättäminen ja liian heikon kiinnityksen tekeminen.

## 5.5 Ohjausjärjestelmän turvaominaisuudet

Ohjausjärjestelmien tarkoituksena on huolehtia koneen toiminnasta ja että konetta käytetään suunnittelijan tarkoittamalla tavalla (Siirilä, 2016, s. 465). Nivelpuomikeventimen PLC-ohjelman avulla voidaan ohjata käyttäjää toimimaan suunnitellulla tavalla. Ohjausjärjestelmällä voidaan valvoa määritellyn työkierron noudattamista, jolloin koneen väärinkäytön riski pienenee. Ohjausjärjestelmällä on myös tärkeä rooli turvallisuuden varmistamisessa (Siirilä, 2016, s. 465). Osa ohjausjärjestelmästä liittyy suoraan turvallisuuden varmistamiseen, jolloin sen suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmän osat on eriteltävä muusta järjestelmästä ja niiden on täytettävä tarkemmat vaatimukset. Ohjausjärjestelmien turvaominaisuuksien käyttäminen tarkoittaa, ettei kaikkia koneen riskejä pystytä pienentämään riittävästi luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä.

Nivelpuomikeventimen keskeisin turvatoiminto estää käyttäjää pudottamasta kappaletta kesken noston. Turvatoiminnon tehtävä on varmistaa, että kappale on laskettu tukevaa alustaa vasten ennen kuin tarttujan avaaminen on mahdollista. Tämä turvatoiminto koostuu induktiivisesta rajakytkimestä eli tulosta ja turvareleestä eli logiikasta. Turvareleellä estetään signaalin kulku bistabiilille venttiilille, joka ohjaa tarttujaa. Turvallisuus saavutetaan, kun ohjaussignaalit estetään, sillä bistabiilissa venttiilissä venttiilin kara jää viimeisen signaalin asettamaan asentoon eikä siten vaihda virrattomana tilaansa. Myös venttiilin vikaantuminen huomioitaisiin, jos turvallisuus perustuisi esimerkiksi venttiilin jousipalautukseen.

Turvatoiminnosta on hyvä huomioida myös mekaaninen puoli. Puomin viimeiseen niveleen on suunniteltu kahdeksan millimetrin pystysuuntainen liike (Kuva 21, kohta 1). Kun tarttujassa oleva kappale lasketaan esimerkiksi pöydälle, tapahtuu viimeisessä nivelessä liike. Tämä liike havaitaan induktiivisellä rajakytkimellä (Kuva 21, kohta 2). Turvatoiminnon ohittaminen ei saa olla liian helppoa tai houkuttelevaa käyttäjälle. Tässä tapauksessa viimeinen nivel on suojattu siten, että sen lukitseminen tahallaan vaaralliseen asentoon ei ole mahdollista. Turvatoiminnolta saatavaa signaalia hyödynnetään myös koneen käytön helpottamiseksi. Laskuliike pysäytetään automaattisesti, kun havaitaan kuorman lasku. Lisäksi käyttäjälle ilmoitetaan merkkivalolla, milloin tarttujan avaaminen on mahdollista ja milloin se on estetty.



**Kuva 21. Kolmannen nivelen rakenne ja anturointi.**

Kun on määritetty turvatoiminnon vaatimukset ja toimintaperiaate, voidaan määrittää vaadittava suoritustaso turvatoiminnolle luvun 4.2.1 perusteella. Vahingon vakavuus  $S$  on luokassa  $S2$ , koska kappaleen putoaminen käyttäjän jalan päälle voisi aiheuttaa vakavia vammoja. Käyttäjän vaaralle altistumisen osuus on noin puolet koneen käyttöajasta, joten altistumisen taajuus  $F$  on myös luokassa  $F2$ . Vahingon välttämisen todennäköisyys on  $P1$ . Käyttäjällä on mahdollisuus välttää vahingot putoavasta kappaleesta. Koneen käyttö on suunniteltu siten että käyttäjä on aina noin metrin päässä (Kuva 16) putoavasta kappaleesta eikä sen alla. Kuvan 9 perusteella ja edellä kuvatuilla muuttujien arvoilla voidaan määrittää, että turvatoiminnolta vaaditaan turvatasoa  $d$  eli  $PL_r = d$ .

Turvatoiminto koostuu tässä tapauksessa kahdesta alijärjestelmästä. Ensimmäinen alijärjestelmä muodostuu induktiivisesta rajakytkimestä. Toisen alijärjestelmän muodostaa turvarele, joka käsittelee rajakytkimen tilan ja sen perusteella estää tai sallii ohjaussignaalien kulun paineilmaventtiilille. Taulukossa 14 on esitetty tämän turvaominaisuuden ja hätäpysäytyksen komponenttien tietoja.

**Taulukko 14. Turvatoimintojen komponenttien arvoja.**

Komponentti	PFH <sub>D</sub> (1/h)	MTTF <sub>D</sub> (vuotta)	DC <sub>avg</sub> (%)	PL	Luokka
Rajakytkin (IFM, 2022)	$1 \cdot 10^{-7}$			d	2
Painike			99		
Rele (Movetec, 2022)	$1,94 \cdot 10^{-9}$	> 378	99	e	4
Taajuusmuuttaja (Nidec, 2019)	$9,61 \cdot 10^{-11}$	> 2500	99	e	4



Komponenttien valmistajien tietojen perusteella voidaan laskea  $PFH_D$ -arvo koko turvatoiminnolle. Laskemalla alijärjestelmien arvot  $PFH_{D,anturi}$  ja  $PFH_{D,rele}$  yhteen voidaan arvioida koko turvatoiminnon suoritustasoa taulukon 1 perusteella.

$$PFH_{D,SF} = PFH_{D,anturi} + PFH_{D,rele} = 1,94 \cdot 10^{-9} + 1 \cdot 10^{-7} = 1,0194 \cdot 10^{-7}$$

Tämän perusteella turvatoiminnolle saadaan suoritustaso  $d$  (Taulukko 1). Turvatoiminto täyttää sille asetetut vaatimukset, koska  $PL_d \geq PL_r$ .

Systemaattinen vikaantuminen huomioidaan suunnittelussa. Turvatoiminnossa sovelletaan energiattomaksi tekemisen periaatetta. Periaatteen mukaan turvallinen tila saavutetaan käyttämällä tuloissa avautuvia koskettimia ja lähdoissa sulkeutuvia koskettimia (SFS-EN ISO 13849-2, 2012, s. 88). Kun tuloissa käytetään avautuvia koskettimia (NC), voidaan esimerkiksi sähköjohtojen katkeaminen huomata, jolloin turvatoiminnon turvallisuutta ei menetetä. Yhteisvikaantumisen vähentämiseksi seurataan standardin ISO 13849-1 liitettä F.

Tämän turvatoiminnon lisäksi koneessa on vielä kaksi turvareleillä toteutettua toimintoa. Niitä ovat puomin törmäyksen havaitseminen ja kuormanpitolaitteen puristuspaineen valvonta. Näiden yksityiskohtaista suunnittelua ei kuvata tässä, mutta niiden suunnittelu perustuu samaan prosessiin edellisen esimerkin kanssa. Varsinaisten turvatoimintojen lisäksi nivelpuomikeventimessä on täydentävänä suojaustoimenpiteenä hätäpysäytyspiiri.

Nivelpuomikeventimessä hätäseispiirillä varaudutaan etenkin hallintalaitteiden vikaantumiseen. Käyttäjällä on oltava kaikissa tilanteissa mahdollisuus koneen liikkeen pysäyttämiseen. Mikäli ohjaussauvan keinuviipu lukittuu pohjaan, käyttäjä voi hätäpysäytyspainikkeen avulla lopettaa nostoliikkeen. Hätäpysäytys on täydentävä suojaustekninen toimenpide eikä varsinainen ohjausjärjestelmän turvatoiminto. Vaatimuksena on siis pysäyttää koneen moottoroidut liikkeet, mikäli varsinaiset pysäytyslaitteet eivät ole toiminnassa. Hätäpysäytyksellä ei vaikuteta pneumaattisen tarttujan liikkeisiin. Niihin vaikuttaminen lisäisi riskejä taakan putoamiseen.

Riskin arvioinnin perusteella voidaan määritellä vaadittava suoritustaso hätäpysäytykselle. Joidenkin koneiden kohdalla C-tyyppin standardissa asetetaan vaatimus hätäpysäytyksen suoritustasosta. Esimerkiksi teollisuusroboteilta vaaditaan hätäpysäytykselle suoritustasoa  $d$  luokassa 3 (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, s. 26). Käsien ohjattaville kuorman käsittelylaitteille ei ole asetettu vaatimusta hätäpysäytyksen suoritustasosta, joten arvioidaan vaadittu suoritustaso kuten edellisessä esimerkissä.

Vahingon vakavuuden  $S$  luokka on  $S1$ . Sormen tai kämmenen puristuminen pysäytyskohdan ylittyessä aiheuttaisi korkeintaan ruhjeita eikä murtaisi luita. Altistumisen taajuus arvioidaan korkeaksi eli luokkaan  $F2$ . Käyttäjä on alttiina komponenttien vikaantumiselle suurimman osan koneella työskentelyyn käytettävästä ajasta. Vahingon välttämisen todennäköisyydelle luokka on  $P1$ . Käyttäjällä ei pitäisi olla mitään tarvetta pitää käsiä tarttujan kohdissa, joissa olisi puristumisvaara pysäytyskohdan ylittyessä, joten lähtökohtaisesti käyttäjällä on hyvät mahdollisuudet vahingon välttämiseksi. Näiden muuttujien luokkien (Kuva 9) perusteella voidaan määrittää, että hätäpysäytystoiminnolta vaaditaan turvatasoa  $b$  eli  $PL_r = b$ .

Hätäpysäytystoiminto koostuu hätäseispainikkeesta, turvareleestä ja taajuusmuuttajasta. Toiminnon rakenteen mukaan (Kuva 4) hätäseispainike toimii tulona, turvarele lojiikkana ja taajuusmuuttaja lähtönä. Luvussa 3.2.3 määritetään, että hätäpysäytys toiminnon on oltava pysäytysluokan 0 tai 1 mukainen. Taajuusmuuttajassa on ominaisuus turvalliseen vääntömomentin poistoon moottorilta (STO). STO poistaa moottorilta momenttia tuottavan virran, toiminto vastaa pysäytysluokkaa 0 (SFS-EN 61800-5-2, 2017, s. 20).

Seuraavaksi määritetään alijärjestelmille omat suoritustasot yksinkertaistetun menetelmän mukaisesti ja lopuksi arvioidaan koko hätäpysäytystoiminnon suoritustasoa. Hätäpysäytyksen rakenne toteutetaan luokan 4 mukaisesti, jossa rele valvoo myös tulo alijärjestelmän toimintaa. Komponenttien vikaantumista kuvaavat arvot ovat taulukossa 14. Painikkeelle arvioidaan lähteen (Siemens, 2015) perusteella, että  $B_{10d}$  on 100 000.

Hätäpysäytyspainikkeelle voidaan laskea keskimääräisen vikaantumisen aika  $MTTF_D$ . Arvioidaan laskua varten, että hätäpysäytystoimintoa käytettäisiin kerran työpäivässä eli toimintajaksojen määrä vuodessa ( $n_{op}$ ) on 200.

$$MTTF_D = \frac{B_{10d}}{0,1 \cdot n_{op}} = \frac{100000}{0,1 \cdot 200} = 5000$$

Kahdennetussa järjestelmässä turvatoiminto muodostuu kahdesta kanavasta (CH1 ja CH2). Komponenttien tietojen perusteella voidaan laskea kullekin kanavalle keskimääräisen vikaantumisen aika ja lopulta määrittää yhteinen arvo koko alijärjestelmälle.

Standardin kaavan perusteella voidaan laskea  $MTTF_D$ -arvo kanavalle. Kumpikin kanava (CH1 ja CH2) muodostuvat samoista komponenteista, joten kanavilla on yhtä suuret  $MTTF_D$ -arvot:

$$\frac{1}{MTTF_{D,CH1}} = \frac{1}{MTTF_{D,CH2}} = \sum_{i=1}^1 \frac{1}{MTTF_{D,i}} = \frac{1}{5000} \quad (9)$$

$$MTTF_{D,CH1} = MTTF_{D,CH2} = 5000 \text{ vuotta}$$

Molemmilla kanavilla on yhtä suuri  $MTTF_D$ , joten myös koko alijärjestelmälle saadaan sama arvo ( $MTTF_D = 5000$  vuotta). Mikäli kanavilla olisi eri arvot, voitaisiin koko turvatoiminnolle laskea arvo symmetriomalla. Tämä kuvataan tarkemmin ohjausjärjestelmästandardissa.

Alijärjestelmälle (painike) voidaan määrittää nyt suoritustaso ja  $PFH_D$ -arvo. Diagnostiikan keskimääräinen kattavuus on 99 %,  $MTTF_D$  on 5000 vuotta ja rakenne luokan neljä mukainen. Alijärjestelmän suoritustaso näiden arvojen perusteella on  $PL$  e ja  $PFH_D = 9,06 \cdot 10^{-10}$ .

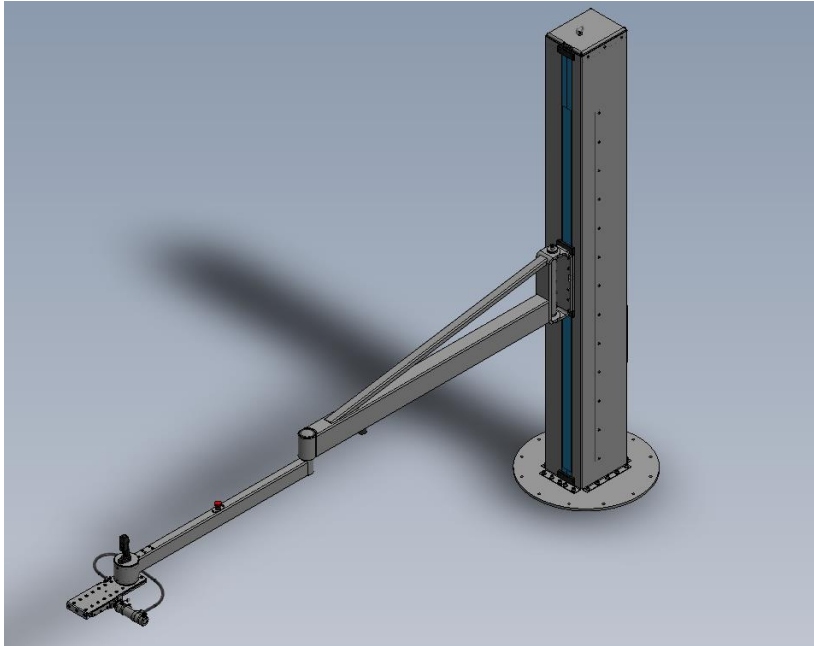
Hätäpysäytyksen suoritustaso voidaan määrittää alijärjestelmien suoritustason perusteella. Tarkin arvio suoritustasosta saadaan laskemalla yhteen alijärjestelmien  $PFH_D$ -arvot  $PFH_{D,painike}$ ,  $PFH_{D,rele}$  ja  $PFH_{D,sto}$ .

$$\begin{aligned} PFH_{D,hätäpysäytys} &= PFH_{D,painike} + PFH_{D,rele} + PFH_{D,sto} \\ &= 9,06 \cdot 10^{-10} + 1,94 \cdot 10^{-9} + 9,61 \cdot 10^{-11} = 2,9421 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

Saavutetaan suoritustaso  $PL$  e (Taulukko 1). Turvatoiminto täyttää sille asetetun vaatimuksen, koska  $PL e \geq PL_R b$ .

## 5.6 Turvallisuusratkaisujen todentaminen

Suunnitellun koneen (Kuva 22) vaatimustenmukaisuudesta varmistutaan ennen valmiin laitteen toimittamista asiakkaalle. Valmistaja suorittaa koneelle standardin vaatimat testaukset, joilla varmistutaan, että kone toimii vaatimusten määrittämällä tavalla. Käsittelylaitteen turvallisuusvaatimusten todentamiseksi käytetään laskentaa, silmämääräistä tarkastusta, ominaisuuksien tarkastusta, staattista koetta ja dynaamista koetta (SFS-EN 14238, 2005, s. 17–18). Todentamisen tavoitteena on varmistua, että tehdyt suunnitteluratkaisut ovat asetettujen vaatimusten mukaisia. Standardin vaatimien kokeiden lisäksi nivelpuomikeventimelle suoritetaan muitakin testejä, jotka kuvataan tämän luvun lopussa.



**Kuva 22. 3d-malli suunnitellusta koneesta.**

Laskennallinen todentaminen liittyy etenkin koneen tyyppitodentamiseen. Tyyppitodentamisessa varmistetaan, että kone on suunniteltu vaatimusten mukaan. Koneen mekaaninen lujuus ja kuormanpitolaitteen pitovoima on todennettava laskentaa käyttämällä. Esimerkiksi pitovoiman laskenta on esitetty luvussa 5.2. Koneen rungon osien kestävyys on varmistettu FEM-analyysillä. Yksittäisistä toimitettavista koneista ei tarvitse todentaa laskennallisesti mitään, kunhan kone on rakennettu alkuperäisten suunnitelmien mukaisesti. Mikäli koneen tukirakenteeseen tai kuormanpitolaitteeseen tehdään muutoksia, pitäisi muutosten jälkeen koneen vaatimustenmukaisuus todentaa jälleen laskennalla.

Staattinen ja dynaaminen koe ovat kokeita, jotka suoritetaan jokaiselle valmistetulle koneelle. Kokeet suoritetaan, kun koneen kokoonpanotyö on valmis. Staattisessa kokeessa selvitetään koneen rakenteiden kestävyyttä ja dynaamisessa kokeessa koneen muuta toimintaa. Molemmissa kokeissa on koneen maksimikuormaa painavampi testikappale, jonka avulla koneen toimintaa testataan.

Staattisessa kokeessa varmistutaan yksittäisen koneen tukirakenteen mekaanisesta lujuudesta. Staattinen koe suoritetaan ennen kunkin koneen markkinoille saattamista. Kokeessa konetta kuormitetaan maksimikuormaan (WLL) nähden 1,25-kertaisella kuormalla. Rakennetta kuormitetaan 10 minuutin ajan, minkä jälkeen kuormitus puretaan ja suoritetaan silmämääräinen tarkastus. Tarkastuksessa varmistutaan, ettei koneessa ei ole pysyviä muodonmuutoksia, halkeamia tai muita vaurioita eikä yksikään koneen liitokista ole löystynyt kuormituksen seurauksena. Koneen toiminta ei myöskään saa muuttua kokeen seurauksena. (SFS-EN 14238, 2005, s. 17)

Suunnitellun nivelpuomikeventimen suurin sallittu kuorma (*WLL*) on 60 kilogrammaa, joten staattinen koe suoritetaan vähintään seuraavalla kuormalla:

$$m_{staattinen,min} = 1,25 \cdot WLL = 1,25 \cdot 60 \text{ kg} = 75 \text{ kg}$$

Ennen kokeen suorittamista käytettävä kuorma punnitaan. Kokeen onnistunut suoritus todentaa koneen mekaanisen rakenteen kestävyysvaatimukset. Mikäli kokeessa havaitaan puutteita, toteutetaan uudet suunnitteluratkaisut puutteiden korjaamiseksi.

Dynaamisella testillä varmistetaan, että kone pystyy suorittamaan kaikki suunnitellut tehtävät vaarantamatta koneen käyttäjää ja että se täyttää standardin asettamat turvallisuusvaatimukset. Koejärjestelyä varten kone on kokoonpantuna valmiiksi, jotta koneen toimintaa voidaan arvioida. Standardin (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 17) mukaan dynaamista koetta käytetään sekä tyyppitodentamiseen että yksilökohtaiseen todentamiseen. Kokeessa käsiteltävä kuorma on 1,1-kertainen koneen maksimikuormaan nähden. Kokeessa suoritetaan useita liikkeitä eli useita pysähdyksiä ja käynnistyksiä koneen koko liikealueella. Koneen on pystyttävä suorittamaan kaikki suunnitellut tehtävät. Kokeen jälkeisessä silmämääräisessä tarkastuksessa ei saa olla havaittavissa vaurioita koneen mekanismeissa tai rakenteellisissa osissa. Koneen liitokset eivät saa olla löystyneitä kokeen seurauksena. (SFS-ISO/TR 14121-2, 2013, s. 17)

Nivelpuomikeventimen kuormitus dynaamisessa kokeessa:

$$m_{dynaaminen,min} = 1,1 \cdot WLL = 1,1 \cdot 60 \text{ kg} = 66 \text{ kg}$$

Dynaamisessa testissä varmistutaan seuraavista asioista:

- koneessa ei esiinny kulkeumaa
- säädettävät osat eivät aukea tahattomasti
- painevika ei aiheuta kappaleen tippumista
- riittävä pitovoima koko kokeen ajan
- sähkönsyötön katkeaminen ei aiheuta vaaraa
- nostoliikkeen nopeus on hallittavissa
- liikkeen rajoittimet toimivat turvallisesti. (SFS-EN 14238, 2005, s. 18-19)

Jokaiselle koneelle suoritetaan myös silmämääräinen tarkastelu. Silmämääräisen tarkastuksen tarkoituksena on varmistua, että osat on asennettu oikein ja että ne toimivat suunnitellusti. Esimerkiksi koneen rakenne tarkastetaan, jotta siinä ei ole teräviä reunoja tai kulmia, jotka aiheuttaisivat vaaroja. (SFS-EN 14238, 2005, s. 18)

Ominaisuuksien tarkastusta käytetään tiettyjen vaatimusten tarkastamisessa. Tässä hyödynnetään silmämääräistä arviointia, minkä avulla varmistutaan, että tietty osa tai ominaisuus täyttää standardin vaatimukset. Esimerkiksi ohjausjärjestelmän hallintalaitteiden toiminta varmistetaan ominaisuuksien tarkastuksella. (SFS-EN 14238, 2005, s. 18) Ohjaussauvan keinukytimestä varmistetaan, että se palautuu keskiasentoon vaikuttamisen jälkeen.

Kaiken kaikkiaan valmistetun koneen kattava testaaminen on tärkeää, jotta voidaan varmistua suunniteltujen toimintojen ja turvaratkaisujen toiminnasta. Suunnitellulle koneelle on määritetty rakennusvaiheeseen myös muita testejä ja tarkastuksia ennen standardin vaatimia kokeita. Näiden testien tarkoituksena on varmistua vielä yksityiskohtaisemmin koneen suunnitelmien mukaisesta toiminnasta.

Kuormanpitolaitteelle suoritetaan kaksi eri koetta. Ensimmäisessä kokeessa testataan tarttujan nostokyky ennen sen kiinnittämistä nivelpuomikeventimeen. Koejärjestelyssä kappale on kiinnitetty kiinteästi pöytään. Tarttujalla otetaan kiinni suunnitellulla 4,5 bar:in suuruisella tartuntapaineella kiinteästä kappaleesta. Tämän jälkeen tarttujaa vedetään irti kappaleesta siltanosturilla ja tartunnan pitävyyttä mitataan vaa'alla. Koetta pidetään onnistuneena, mikäli tarttujan ote ei lipeä ennen 120 kilogrammaa eli  $2 \times WLL$  arvoa. Koejärjestelyn tarkoituksena on tutkia tarttujan nostokykyä ilman vaaraa tippuvasta kappaleesta. Lopuksi säädetään minipaine lopulliseen arvoonsa kokeen tulosten perusteella. Mikäli 4,5 bar paine ei riitä saavuttamaan vaadittua nostokykyä, säädetään korkeampi minimipaine.

Toisessa kokeessa tutkitaan esisäädön toimintaa. Esisäädön on toimittava ja lukittauttava samalla tavalla koko sen liikealueella. Tämä toiminta arvioidaan tekemällä tartuntoja esisäädön eri kohdissa. Samalla testataan, että esisäätö ei aukea tahattomasti. Koskeminen esisäädön vipuun vahingossa ei saa aiheuttaa vaaraa kappaleen tippumisesta.

Kaikista koneelle suoritetuista kokeista ja tarkastuksista laaditaan selvät ohjeistukset testaussuunnitelmaan. Testaussuunnitelmassa esitetään kokeiden odotetut tulokset, joiden perusteella testaaja voi arvioida kokeen onnistumista. Kun kone läpäisee kaikki testit ilman puutteita, voidaan suunnitteluvaiheesta siirtyä koneen markkinoille saattamiseen. Tätä diplomityötä kirjoitettaessa koneen kokoonpanossa ei olla päästy testausvaiheeseen. Koneen vaatimustenmukaisuutta on arvioitu kvalitatiivisesti suunnittelukatselmuksessa sekä loppuasiakkaan kanssa pidetyssä palaverissa. Näiden arviointien perusteella on edetty rakentamaan ensimmäistä konetta.

## 6. MARKKINOILLE SAATTAMINEN

Tässä luvussa käsitellään vaatimuksia, jotka koneen valmistajan on huomioitava ennen koneen saattamista markkinoille. Koneen dokumentaatioon liittyvät vaatimukset ovat oleellisia myös turvallisuuden näkökulmasta. Käyttäjän on pystyttävä luottamaan koneen mukana tulevaan ohjeistukseen ja pystyttävä sen perusteella käyttämään konetta turvalisesti. CE-merkintä puolestaan takaa koneelle vapaan liikkuvuuden Euroopan unionin talousalueella.

Koneen markkinoille saattamiseksi valmistajan on tehtävä seuraavat asiat:

- varmistettava, että kone täyttää sitä koskevat terveys- ja turvallisuusvaatimukset
- varmistettava, että koneen tekninen rakennetiedosto on käytettävissä
- huolehdittava, että koneen käyttäjällä on saatavissa tarvittavat tiedot ja ohjeet
- suoritettava vaatimustenmukaisuuden arviointimenettely konedirektiivin kuvamallalla tavalla
- laadittava koneesta EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus ja varmistettava, että se toimitetaan koneen mukana
- kiinnitettävä koneeseen CE-merkintä. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 6)

Nivelpuomikeventimen tuotekehityksessä varmistutaan terveys- ja turvallisuusvaatimusten noudattamisesta seuraamalla yhdenmukaistettuja standardeja. Suurin osa konetta koskevista vaatimuksista käsitellään konekohtaisessa C-tyyppin standardissa, minkä lisäksi on hyödynnetty muitakin standardeja. Standardeista ja niiden asettamista vaatimuksista kerrotaan tarkemmin luvussa 3.2. Konedirektiivin vaatimusten lisäksi tämän tutkimuksen konetta koskevat pienjännitedirektiivin (2006/95/EY) ja EMC-direktiivin (2014/30/EU) vaatimukset. Kun kone CE-merkitään, on sen oltava kaikkien sitä koskevien direktiivien vaatimusten mukainen. Näiden direktiivien vaatimukset on rajattu pääosin tämän työn ulkopuolelle, mutta niiden noudattaminen on ollut keskeistä koneen sähköjärjestelmän suunnittelussa.

Tekninen tiedosto koostuu rakennetiedostosta ja kuvauksesta sisäisiä toimenpiteitä, joiden avulla jokainen tuotettu kone on vaatimusten mukainen. Rakennetiedostoon kerätään koneen suunnittelua koskevat yksityiskohtaiset tiedot. Rakennetiedosto toimii vaatimustenmukaisuuden arvioinnin pohjana. Koneen valmistajan on kyettävä toimittamaan

tekninen tiedosto viranomaisille pyydettyssä ajassa. Aika määräytyy dokumentaation laajuuden perusteella. Mikäli valmistaja ei toimita teknistä tiedostoa, voidaan konetta pitää vaatimusten vastaisena ja viranomaisen voi asettaa sen käyttö- ja myyntikieltoon. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY)

Rakennetiedostosta on löydyttävä koneen yleiskuvaus ja -piirustus sekä selitykset koneen toiminnan ymmärtämiseksi. Näiden lisäksi koneesta on oltava kaikki laskelmat ja täydelliset piirustukset. Riskien arviointi, siihen liittyvät asiakirjat ja suunnittelussa hyödynnetyt standardit on oltava listattuna rakennetiedostossa. Myös jäljennökset koneen ohjeista ja vaatimustenmukaisuusvakuutuksesta kuuluvat rakennetiedostoon. Rakennetiedostoa on pidettävä viranomaisten saatavilla kymmenen vuoden ajan koneen valmistamisesta. Rakennetiedoston ei tarvitse kattaa tietoja, jotka eivät liity terveys- ja turvallisuusvaatimusten noudattamisen varmistamiseen. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, 2006, s. 48) Tämän projektin osalta rakennetiedostona toimii projektikansio, johon on kerätty kaikki koneen suunnitteluun liittyvä tieto. Suunnittelun kannalta on tärkeää dokumentoida tehtyä työtä mahdollisimman kattavasti, jotta tehtyjen ratkaisujen perustelut ovat esitettynä myös koneen rakennetiedostossa.

Konedirektiivin mukaan koneen mukana tulee toimittaa ohjeet koneen asentamiseen, käyttämiseen ja huoltamiseen. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 25) Konekohtaiset C-tyyppin standardit antavat tarkennuksia tämän vaatimuksen toteuttamiseksi. Standardin (SFS-EN 14238, 2005, s. 19) mukaan käsin ohjattavassa kuorman käsittelylaitteessa on oltava tiedot koneen

- turvallisesta käytöstä
- käyttötarkoituksesta
- käyttöönotosta
- käsittely- ja siirto-ohjeet.

Näiden lisäksi on kuvattava käsiteltävät kuormat ja annettava suositus kuulonsuojainten käytöstä meluisassa ympäristössä. (SFS-EN 14238, 2005, s. 19)

Käyttöohje on keskeinen tiedonlähde koneen ostajalle ja käyttäjälle. Sen perusteella on saatava käsitys koneen tarkoituksenmukaisesta käytöstä ja koneeseen liittyvistä jännönsriskeistä. Näiden perusteella on pystyttävä varmistamaan koneen soveltuvuus suunniteltuun käyttötarkoitukseen. Nivelpuomikeventimen käyttöohjeessa kuvataan esimerkiksi, millaisten kappaleiden käsittelyyn kone on tarkoitettu ja millaisia taakkoja sillä ei



saa nostaa. Hauraiden, öljyisten tai vaarallisia aineita sisältävien kappaleiden nostaminen on kielletty. Näiden lisäksi nivelpuomikeventimen käyttö henkilönostimena on kielletty.

Riskien arvioinnin perusteella suurimmat jäännösriskit liittyivät koneen nostamiseen ja liikutteluun sekä sähkökeskukseen. Sähkökeskuksen saa avata ainoastaan SFS 6002 mukaisesti opastettu henkilö, jotta työntekijällä on riittävä käsitys sähkökeskuksessa olevista vaaroista. Maallikko ei saa avata sähkökeskusta. Ohjeissa neuvotaan myös koneen turvallista nostamista ja ilmoitetaan koneen kokonaispaino. Näiden tietojen pohjalta on mahdollista varmistaa oikeiden nostovälineiden käyttäminen ja turvalliset työtavat. Toimimalla ohjeiden mukaisesti käyttäjän on mahdollista välttää vahingot ja tapaturmat koneella työskennellessään.

Käyttöohjeiden lisäksi koneen mukana toimitetaan huolto-ohjeet. Huolto-ohjeissa määritetään ja neuvotaan koneelle tehtävät tarkastukset ja huollot. Lisäksi varoitetaan korjauksiin liittyvistä vaaroista ja ohjeistetaan turvalliset työskentelytavat. (SFS-EN 14238, 2005, s. 20) Nivelpuomikeventimen huolto-ohjeessa kuvataan tarvittavat rasvaukset ja rullaketjujen sekä tarttujan huoltaminen. Rullaketjujen yllättävät liikkeet on estettävä huolto-toimenpiteiden aikana. Esimerkiksi rullaketjujen kiristyksen ajaksi puomi on ajettava tukea vasten, jotta se ei pääse tippumaan. Nämä ja voiteluun liittyvät turvalliset työtavat kuvataan koneen huolto-ohjeessa.

Koneeseen on merkittävä valmistajan tiedot, kuvaus koneesta ja CE-merkintä. Näiden lisäksi merkitään tyyppimerkintä, mahdollinen sarjanumero ja rakennusvuosi. Rakennusvuodeksi merkitään vuosi, jonka aikana koneen rakentaminen on valmistunut. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 24) Konedirektiivin vaatimusten lisäksi standardi vaatii suurimman nostettavan massan ja koneen massan ilmoittamista. (SFS-EN 14238, 2005, s. 21) Näiden vaatimusten mukaan koneelle laaditaan tyyppikilpi. Koneen tyyppikilven on erotuttava koneen komponenteissa mahdollisesti olevista CE-merkinnöistä (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY).

Käyttöohjeiden lisäksi jäännösriskeistä varoitetaan koneeseen liitettävillä merkinnöillä. Jäännösriskeistä annetaan tarkempi kuvaus käyttöohjeissa, mutta merkittävimmistä riskeistä liimataan varoitustarra koneeseen. Ylikuormittamisen välttämiseksi koneen nostopuomiin merkitään näkyvästi suurin sallittu kuorma. Myös tarttujan yläpintaan liittyvästä puristumisriskistä ja sähkökeskuksen riskeistä varoitetaan tarroilla. Lisäksi tarran avulla kehoitetaan käyttäjää tutustumaan käyttöohjeeseen.

Vaatimustenmukaisuuden arvioiminen kuvaillaan konedirektiivin kahdeksannessa liitteessä. Varmistaminen koostuu kahdesta vaiheesta. Koneen valmistajan on koottava jokaisesta koneen tyyppistä tekninen tiedosto, mikä täyttää konedirektiivin sille asettamat vaatimukset. Tämän lisäksi valmistajan on varmistuttava, että kone rakennetaan teknisen tiedoston ja konedirektiivin vaatimusten mukaiseksi. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 50) Mikäli suunniteltavana koneena olisi esimerkiksi nivelakseli tai autonostin, olisi vaatimustenmukaisuuden arvioinnille tiukempia vaatimuksia.

Valmistajan on vakuutettava, että kone on suunniteltu, rakennettu ja dokumentoitu Euroopan unionin laatimien direktiivien vaatimusten mukaisesti. Tämä tehdään laatimalla koneesta EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus. Konedirektiivin (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY) mukaan vaatimustenmukaisuusvakuutuksessa on oltava valmistajan ja koneen tietojen lisäksi listaus direktiiveistä, joiden vaatimukset kone täyttää. Vakuutuksessa listataan yhdenmukaistetut standardit, joita on käytetty suunnittelussa täyttämään direktiivien vaatimukset. Tämän lisäksi asiakirjaan muotoillaan vakuutus siitä, että kone täyttää direktiivien vaatimukset. Vakuutuksessa on myös mainittava henkilö, joka tarvittaessa vastaa teknisen tiedoston toimittamisesta viranomaisille. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, s. 42)

Koneen suunnitteluvaihe päättyy käyttöä koskevien tietojen laatimiseen. Ensimmäisen koneen rakentamisen jälkeen varmistutaan, että myös seuraavat koneet valmistetaan rakennetiedoston mukaiseksi. Jokaiselle valmistetulle koneelle suoritetaan staattinen ja dynaaminen koe, jotta varmistutaan vaatimustenmukaisuudesta. Lisäksi jokaisen koneen mukana toimitetaan tarvittava dokumentaatio.

## 7. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää nivelpuomikevennintä koskevat turvallisuusvaatimukset ja suunnitella koneesta uusi versio, joka täyttää asetetut vaatimukset. Työssä edettiin kirjallisuuskatsauksen pohjalta riskin arviointiin ja lopulta suunnitteluratkaisujen kehittämiseen sekä niiden arviointiin.

Työn ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää konetta koskevat turvallisuusvaatimukset. Konedirektiivi asettaa koneille sekä yleisiä vaatimuksia, että osalle koneista tarkentavia vaatimuksia. Nivelpuomikeventimen kohdalla suunnittelussa oli huomioitava nostoihin liittyvistä vaaroista aiheutuvat vaatimukset. Lisäksi selvitettiin konedirektiivin asettamat yleiset periaatteet riskien arvioimiseksi ja toimintatapa riskien pienentämiseksi. Turvallisuusvaatimusten osalta työ vastaa hyvin asetettuun tutkimuskysymykseen. Kirjallisuuskatsauksen perusteella keskeiset vaatimukset ja suunnittelussa hyödynnettävät standardit käsiteltiin luvussa kolme.

Toisena tutkimuskysymyksenä oli selvittää vaarat, joita käyttäjä kohtaa työskennellessään koneella. Riskin arvioinnin perusteella selvitettiin vaarat. Riskin arvioinnin tulokset ovat tämän tutkimuksen välituloksia, joita hyödynnettiin suunnitteluratkaisujen kehittämisessä. Riskin arviointiin osallistui kohdeyrityksessä laajempi työryhmä, jotta saatavat tulokset olisivat luotettavia ja mahdollisimman objektiivisia. Kirjallisuuskatsauksen perusteella löydettiin aiemmista tapaturmista useita suunnittelussa huomioitavia asioita.

Kolmantena tavoitteena oli kehittää suunnitteluratkaisuja, joiden avulla saadaan valmistettua turvallinen kone loppukäyttäjälle. Luvussa viisi esitettiin tehtyjä suunnitteluratkaisuja vaarojen poistamiseksi ja riskien pienentämiseksi. Muutaman vaaran kohdalla onnistuttiin poistamaan vaara kokonaan luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä. Nivelpuomikeventimen puomia ei voi enää käyttää ollenkaan puristamiseen. Tämä on merkityksellistä etenkin, kun uudessa versiossa liikenopeutta on kasvatettu. Myös tarttujasta onnistuttiin poistamaan puristumisvaara, joka liittyi sylinterin liikkeeseen. Merkittävä tulos oli myös ohjausjärjestelmän turvatoiminto, joka estää käyttäjää pudottamasta kuorman kesken noston. Kaksin käsin hallintalaitteiden avulla olisi voitu pienentää riskiä jonkin verran, mutta nyt riski saatiin todella pieneksi.

Kvalitatiivisen tarkastelun perusteella suunnitteluratkaisuilla onnistuttiin vastaamaan viimeiseen tutkimuskysymykseen. Ensimmäisen nivelpuomikeventimen tuotanto on aloitettu tämän työn tuloksena syntyneiden piirustusten ja suunnitelmien pohjalta. Tältäkin kannalta voidaan todeta, että tutkimus vastasi hyvin asetettuihin tavoitteisiin.

Jatkotutkimuksena koneen toimintaa voisi tutkia kvantitatiivisten testien perusteella. Jos kokeissa havaittaisiin puutteita, voidaan synteessin avulla etsiä uusia suunnitteluratkaisuja ja tutkia niiden toimintaa. Tämä tutkimus on keskittynyt koneen suunnitteluvaiheeseen. Suunnitteluvaiheessa on kuvattu myös myöhemmin tehtäviä testejä ja kokeita. Työn jälkeisiä toimenpiteitä kohdeyrityksessä on näiden testien suorittaminen, kun kone on edennyt kokoonpanoon.

Työssä käytetty lähestymistapa on sovellettavissa myös muiden konedirektiivin alaisten koneiden suunnitteluun. Etenkin koneet, joiden kanssa ihminen on jatkuvasti vuorovaikutuksessa, on suunniteltava pitäen turvallisuus tärkeimpänä prioriteettina. On kuitenkin huomioitava, että tässä työssä ei ole lueteltu läheskään kaikkia koneiden suunnittelun vaatimuksia vaan on keskitytty nivelpuomikeventimeen ja sen osalta keskeisiin asioihin. Muun tyyppisten koneiden suunnittelussa nousevat esiin eri vaarat ja siten myös toisenlaisia vaatimuksia suunnittelulle. Työssä kuitenkin esitellään monia yleisesti hyödynnettäviä työkaluja ja prosesseja, joita voidaan käyttää useissa suunnitteluprojekteissa.

Koneturvallisuuteen liittyy todella paljon eri näkökohtia, joten aiheen ympärillä voidaan tehdä varmasti paljonkin jatkotutkimusta. Keskeistä on muistaa myös konedirektiivin periaate huomioida tekniikan ajankohtainen taso. Nyt tehdyt suunnitteluratkaisut eivät ole välttämättä riittäviä muutaman vuosikymmenen päästä, jolloin tekniikka on kehittynyt. Tekniikan kehitys takaa jatkuvasti uutta tutkittavaa koneturvallisuuden alalla.

## LÄHTEET

Azzi, A., Maoui, A., Fatu, A., Fily, S. & Souchet, D. (2019) 'Experimental study of friction in pneumatic seals', *Tribology International*, 135, s. 432–443.

Coulson, D. (2015) 'Risk Estimation: 25 years on', *Safety & Health Practitioner*. Saatavissa (viitattu 23.3.2022): <https://www.shponline.co.uk/blog/risk-estimation-25-years/>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY (2006) 'Koneista ja direktiivin 95/16/EY muuttamisesta', Euroopan unionin virallinen lehti, L 157/24. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0042&from=FI>.

Hippertt, M.P., Junior, M.L., Szejka, A.L., Junior, O.C., Loures, E.R. & Portela Santos, E.A. (2019) 'Towards safety level definition based on the HRN approach for industrial robots in collaborative activities', *Procedia Manufacturing*, 38, s. 1481–1490.

IFM (2022) 'GF711S - Induktiivinen turva-anturi – ifm', verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.3.2022): <https://www.ifm.com/fi/fi/product/GF711S>

Metecno (2020) 'MetEMAN® | NPK 30-1600 | Erikoiskone koneistamoille'. Saatavissa (viitattu 4.4.2022): <https://www.youtube.com/watch?v=2CF7-pgg-CQ>

Metecno (2022a) 'MetEMAN®-erikoiskoneet', verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.5.2022): <https://www.metecno.fi/meteman-erikoiskoneet/>

Metecno (2022b) 'Riskin arviointi pohja'.

METSTA (2020) Riskinarviointityökalu, METSTA. Saatavissa (viitattu 13.2.2022): <https://metsta.fi/koneturvallisuuden-standardit-metsta/riskinarviointityokalu/>

Movetec (2022) 'Turvarele MSR127RP/TP'. Saatavissa: [https://movetec.fi/wp-content/uploads/2021/12/MSR-yleisturvarele\\_esite.pdf](https://movetec.fi/wp-content/uploads/2021/12/MSR-yleisturvarele_esite.pdf)

Nidec (2019) 'Commander C200/C300'. Saatavissa: <https://acim.nidec.com/drives/control-techniques/-/media/controltechniques/files/step-by-step-guides/commander-c200-c300-control-user-guide-issue-1.ashx>

SFS-EN 13557 (2008) 'Nosturit. Hallintalaitteet ja ohjauspaikat', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 52 s.

SFS-EN 14238 (2005) 'Nosturit. Käsien ohjattavat kuorman käsittelylaitteet', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 55 s.

SFS-EN 60204-32 (2008) 'Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 32: Vaatimukset nostokoneille', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 248 s.

SFS-EN 61800-5-2 (2017) 'Adjustable speed electrical power drive systems - Part 5-2: Safety requirements – Functional', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 89 s.

SFS-EN ISO 10218-1 (2011) 'Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 90 s.

SFS-EN ISO 12100 (2010) 'Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 186 s.

SFS-EN ISO 13849-1 (2015) 'Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 193 s.

SFS-EN ISO 13849-2 (2012) 'Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 2: Kelpuutus', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 171 s.

SFS-EN ISO 13850 (2015) 'Koneturvallisuus. Häätäpysäytys. Suunnitteluperiaatteet', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 34 s.

SFS-EN ISO 14120 (2015) 'Koneturvallisuus. Suojukset. Kiinteiden ja avattavien suojusten suunnittelun ja rakenteen yleiset periaatteet', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 87 s.

SFS-ISO/TR 14121-2 (2013) 'Koneturvallisuus. Riskin arviointi. Osa 2: Käytännön opastusta ja esimerkkejä menetelmistä', Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 80 s.

Siemens (2015) 'Emergency Stop in PL e'. s. 10. Saatavissa (viitattu 9.3.2022): [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/356/109479356/att\\_857954/v1/Emergency\\_stop\\_in\\_PL\\_e\\_with\\_SINUMERIK\\_840D\\_sl\\_en.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/356/109479356/att_857954/v1/Emergency_stop_in_PL_e_with_SINUMERIK_840D_sl_en.pdf)

Siirilä, T. (2016) 'Koneturvallisuuden käsikirja', Inspecta, Helsinki, 720 s.

Sundquist, M. (2019a) 'Turvallisen koneen suunnittelu - Osa 5: Koneen ohjausjärjestelmän yksinkertaistettu suunnittelumenetelmä Sistema', METSTA, 47 s. Saatavissa (viitattu 21.3.2022): <https://metsta.fi/wp-content/uploads/2020/05/TU19D31.pdf>

Sundquist, M. (2019b) 'Turvallisen koneen suunnittelu – Osa 3: Koneiden järjestelmällinen suunnitteluprosessi', 39 s. Saatavissa (viitattu 13.2.2022): <https://metsta.fi/wp-content/uploads/2020/05/Turvallisen-koneen-suunnittelu-osa-3.-Koneiden-j%C3%A4rjestelm%C3%A4llinen-suunnitteluprosessi.pdf>

Tapaturmavakuutuslaitosten liitto (2012) 'Saksilavanostimilla sattuneet työpaikkakuolemantapaukset (teematutkinta)', 16 s. Saatavissa (viitattu 24.2.2022): <http://totti.tvk.fi/tottipublic/totcasepublic.view?action=caseReport&unid=909>

Tapaturmavakuutuslaitosten liitto (2013) 'TOT 3/13'. Saatavissa (viitattu 19.2.2022): <http://totti.tvk.fi/tottipublic/totcasepublic.view?action=caseReport&unid=923>

Työtaturma- ja ammattitautilaki 2015/459 (2015), Oikeusministeriö. Saatavissa (viitattu 24.2.2022): <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20150459>

Työterveyslaitos (2022) Tuki- ja liikuntaelimistön terveys ja työkyky. Available at: <https://www.ttl.fi/teemat/tyoterveys/tuki-ja-liikuntaelimiston-terveys-ja-tyokyky>

Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta 2008/400 (2008), Oikeusministeriö. Saatavissa (viitattu 13.2.2022): <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2008/20080400#L4>