

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutus

Ville Heinonen

KARSINTAVOIMIEN MITTAUSLAITTEISTON SUUNNITTELU

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2021



OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2021
Konetekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)
Ville Heinonen

Nimeke
Karsintavoimien mittauslaitteiston suunnittelu

Toimeksiantaja
Waratah OM Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella karsintavoimien mittauslaitteisto Waratah OM Oy:n tutkimuskäyttöön. Suunniteltavan mittauslaitteiston avulla oli tarkoitus tutkia oksien leikkaantuvuutta ja siihen tarvittavaa voimaa eri karsintaterien teräprofiileilla.

Suunnittelun apuna hyödynnettiin systemaattista suunnittelumetodia VDI 2221 sekä Ulrich & Eppinger -tuotekehitysmenetelmän mukaista tuotekehitysprosessin mallia. Työn kirjallisuuskatsauksessa syvennytään näiden menetelmien eri vaiheisiin, ja käydään läpi karsintavoimaan vaikuttavia tekijöitä. Suunnittelutyö painottui mittauslaitteiston mekaniikkasuunnitteluun, liitoksien käsin mitoittamiseen sekä rakenteen lujuustarkasteluun FEM-analyysin avulla. Liitoksien mitoittamisessa noudatettiin SFS-EN 1993-1-8 Eurocode 3:n mukaisia hitsaus- ja ruuviliitoksien mitoitusohjeita.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kehitettyä standardien mukainen ja turvallinen mittauslaitteisto, jonka avulla karsintavoimien tutkiminen oli mahdollista. Laitteistolle asetetut vaatimukset saatiin täytettyä, jonka lisäksi onnistuttiin hankkimaan arvokasta informaatiota opinnäytetyön toimeksiantajalle.

Kieli
suomi

Sivuja 109
Liitteet 13
Liitesivumäärä 18

Asiasanat
tuotekehitys, karsintavoima, Eurocode 3, FEM-analyysi



THESIS
June 2021
Degree Programme in Mechanical Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Ville Heinonen

Title
Design of Delimiting Forces Measuring Device

Commissioned by
Waratah OM Oy

Abstract

The purpose of this thesis was to design a delimiting forces measuring device for the research use of Waratah OM Oy. Measuring device was intended to study the shearability of the branches and the force required for it with different delimiting blade profiles.

The systematic design method VDI 2221 and the product development process template according to the Ulrich & Eppinger method were utilized to aid the design. In the written review of the work, the various stages of these methods are presented, and the factors influencing the delimiting forces are reviewed. The design work focused on the mechanical design of the measuring device, the manual dimensioning of the joints and the examination of the strength of the structure using FEM-analysis. The dimensioning instructions for welding and screw joints in accordance with SFS-EN 1993-1-8 Eurocode 3 were followed in dimensioning the joints.

As a result of the thesis, a standard and safe measuring device was developed, which made it possible to study the delimiting forces. The requirements set for the device were acquired and moreover, it was possible to obtain valuable information for the client of the thesis.

Language
Finnish

Pages 109
Appendices 13
Pages of Appendices 18

Keywords
product development, delimiting force, Eurocode 3, FEM-analysis

Sisältö

| | | |
|--------|---|----|
| 1 | Johdanto | 7 |
| 1.1 | Opinnäytetyön aihe | 7 |
| 1.2 | Waratah OM Oy | 7 |
| 1.3 | Opinnäytetyön toimeksianto | 9 |
| 1.4 | Opinnäytetyön rajausta | 10 |
| 1.5 | Opinnäytetyön tavoitteet | 10 |
| 2 | Tuotekehitystoiminta | 11 |
| 2.1 | Yleistä tuotekehitystoiminnasta | 11 |
| 2.2 | Prosessimallit suunnittelun apuna | 13 |
| 3 | Systemaattinen suunnittelumetodi VDI 2221 | 14 |
| 3.1 | Tehtävän selvittely | 16 |
| 3.1.1 | Tiedonhankinta | 16 |
| 3.1.2 | Vaatimusluettelo | 16 |
| 3.2 | Luonnostelu | 17 |
| 3.2.1 | Abstrahointi | 17 |
| 3.2.2 | Toimintorakenteen suunnittelu | 18 |
| 3.2.3 | Vaikutusperiaatteiden ideointi ja niiden yhdistäminen | 19 |
| 3.2.4 | Ratkaisumuunnelmien valinta ja pisteytys | 21 |
| 3.3 | Kehittäminen | 24 |
| 3.4 | Viimeistely | 26 |
| 4 | Ulrich & Eppinger -tuotekehitysprosessi | 27 |
| 4.1 | Tehtävän selvittäminen | 28 |
| 4.2 | Konseptisuunnittelu | 30 |
| 4.3 | Systemaattinen suunnittelu | 32 |
| 4.4 | Detaljisuunnittelu | 33 |
| 4.5 | Testaus ja parannus | 34 |
| 4.6 | Tuotannon käynnistäminen | 34 |
| 5 | Mittauslaitteiston suunnitteluprosessi | 35 |
| 5.1 | Tehtävän selvittely | 35 |
| 5.1.1 | Alkusuunnittelukatsaus | 35 |
| 5.1.2 | Vaatimusluettelo | 36 |
| 5.2 | Luonnosteluvaihe | 37 |
| 5.2.1 | Tuotespesifikaatio | 37 |
| 5.2.2 | QFD – laatukaavio | 37 |
| 5.2.3 | Osatoimintoihin jako ja toimintorakenteen muodostaminen | 39 |
| 5.2.4 | Osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot ja niiden valinta | 40 |
| 5.3 | Kehittelyvaihe | 42 |
| 5.3.1 | Koneturvallisuus | 42 |
| 5.3.2 | Käyttöympäristö | 43 |
| 5.3.3 | Karsintavoimaan vaikuttavat tekijät | 44 |
| 5.3.4 | Sylinterin mitoittaminen | 48 |
| 5.3.5 | Rungon suunnittelu | 54 |
| 5.3.6 | Karsintaterän ohjaus ja sen kiinnitykset | 56 |
| 5.3.7 | Hitsausliitokset | 57 |
| 5.3.8 | Ruuviliitokset | 61 |
| 5.3.9 | Karsintavoiman mittaus | 68 |
| 5.3.10 | Keino-oksien tuenta ja kiinnitys | 69 |
| 5.3.11 | Pituudensäätömekanismi | 71 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5.3.12 | Mittauslaitteiston lujuustarkastelu | 72 |
| 5.4 | Viimeistelyvaihe | 82 |
| 6 | Opinnäytetyön lopputulos | 83 |
| 6.1 | Mittauslaitteiston kokoonpano..... | 83 |
| 6.2 | Anturin kiinnitys ja liukumekanismi | 86 |
| 6.3 | Karsintatuki | 87 |
| 7 | Yhteenveto..... | 87 |
| | Lähteet..... | 89 |

Liitteet

| | |
|----------|---------------------------------------|
| Liite 1 | Alkusuunnittelukatsaus |
| Liite 2 | Vaatimusluettelo |
| Liite 3 | Päivitetty vaatimusluettelo |
| Liite 4 | Alustava tuotespesifikaatio |
| Liite 5 | QFD-LaatuKaavio |
| Liite 6 | Osatoimintojen ideointi |
| Liite 7 | Osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot |
| Liite 8 | Ratkaisumuunnelmien pisteytystaulukko |
| Liite 9 | Sylinteri CDM1MF1 |
| Liite 10 | Kuulaholkki R1065 |
| Liite 11 | Hitsausliitoksien laskut |
| Liite 12 | Ruuviliitosten laskut |
| Liite 13 | Voima-anturi KMB 090 |

Lyhenteet ja standardit

| | |
|------------------|---|
| DFA | Suunnittelumetodi, jossa tuote tai sen osa suunnitellaan mahdollisimman helposti kokoonpantavaksi. [9.] |
| DFMA | Suunnittelumetodi, jossa tuote tai sen osa suunnitellaan mahdollisimman helposti valmistettavaksi ja kokoonpantavaksi. [9.] |
| MBD | Tuotteen täydellinen määrittely sen 3D-mallin avulla. Malliin lisätään mitat, toleranssit, valmistukseen ja mittaukseseen liittyvät tiedot. [14.] |
| QFD-laatukaavio | Asiakaslähtöinen tuotteiden ja palveluiden kehitysjärjestelmä. [5, 81.] |
| FEM-analyysi | Elementtimenetelmän avulla suoritettu laskenta, jota käytetään rakenteen kestävyuden tarkasteluun ja optimointiin. [5, 113–114.] |
| SPA-analyysi | Kahden laskentakierroksen lujuusanalyysi, jossa 1. kierroksen laskennassa käytetään 3. asteen polynomifunktiota. |
| MPA-analyysi | Luotettavampi lujuusanalyysin laskentatapa, jossa voidaan tarkastella tuloksien luotettavuutta, sekä muokata käytettävää polynomiastetta. |
| SFS-ISO 6020-1 | Hydrauliikka ja pneumatiikka. Sylinterit yksipuolisella männänvarrella. 160 bar sarja. Osa 1: Keskisarja. [18.] |
| SFS-EN 1993-1-8 | Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–8: Liitosten mitoitus. [19.] |
| SFS-EN ISO 898-1 | Kiinnittimien lujuusominaisuudet. Seostamattomat ja seosteräkset. Osa 1: Ruuvien ja vaarnaruuvien lujuusluokat. Vakiokierre ja taajakierre. [20.] |

1 Johdanto

Puiden karsintaan tarkoitetuissa harvesteripäissä käytetään profiililtaan useita eri muotoisia ja kokoisia karsintateriä, joista jokainen käyttäytyy karsintatapahtuman aikana hieman eri tavoin. Näiden terien suunnittelutyö on melko haastavaa, mikä johtuu teriin kohdistuvista voimista. Karsintavoimien käyttäytymistä on hyvin vaikea simuloida, ja siksi olisikin tärkeää tuntea, miten eri teräprofiilit käyttäytyvät karsintatapahtuman aikana.

1.1 Opinnäytetyön aihe

Tässä opinnäytetyössä käsitellään harvesteripään karsintateriin kohdistuvien voimien mittauslaitteiston suunnittelua. Toimeksiantajana opinnäytetyölle toimi Waratah OM Oy, jonka tutkimuskäyttöön mittauslaitteisto suunniteltiin.

Tarve opinnäytetyölle tuli toimeksiantajalta vuoden 2020 loppupuolella, jolloin päätettiin opinnäytetyön aikataulusta ja muista käytännön asioista. Työn aloittamisen ajankohdaksi sovittiin tammikuu 2021, ja alustavan suunnitelman mukaisesti työn valmistumisajankohdaksi asetettiin toukokuun 2021 loppu.

Opinnäytetyön teoriaosiossa käsitellään tuotekehitystoiminnan eri vaiheita ja yleisiä piirteitä, esitellään erilaisia tuotekehityksen prosessimalleja ja syvennyttään tarkemmin VDI 2221 -standardiin sekä Ulrich & Eppinger -tuotekehitysmenetelmän mukaiseen tuotekehitysprosessin malliin. Työn toteutusvaiheessa seurataan suunnitteluprosessin etenemistä sekä käydään läpi koneturvallisuuden ja liitosten mitoittamiseen liittyviä tekijöitä.

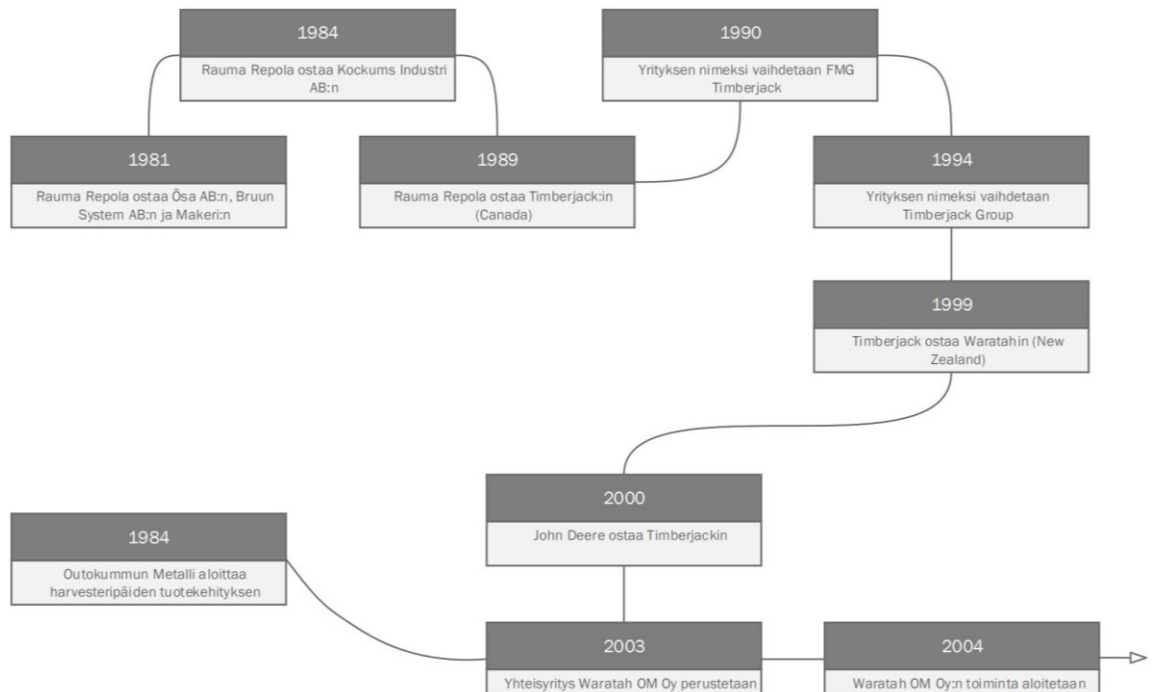
1.2 Waratah OM Oy

Waratah OM Oy on vuonna 2003 perustettu pohjoiskarjalainen harvesteripäiden tuotekehitykseen ja valmistukseen erikoistunut metallialan yritys. Sen omistavat yhdessä John Deere Forestry Oy ja Outokummun Metalli Oy. John Deere

Forestry Oy:n osuus yrityksen omistuksesta on 51 % ja Outokummun Metallin 49 %. [1.]

Waratah OM Oy:n taustalla on pitkä historia harvesteripäiden tuotekehityksessä ja valmistuksessa. Harvesteripäiden tuotekehitys Outokummun Metallilla aloitettiin jo vuonna 1984, ja samanaikaisesti yritys aloitti myyntiyhteistyön Rauma-Repolan metsäkoneyhmän kanssa. 1980- ja 1990-luvuilla Rauma-Repola teki useita yritysostoja, joiden myötä se kasvatti asemaansa metsäkonealalla. [2.]

2000-luvulle tultaessa John Deere osti silloisen Timberjackin (ent. Rauma-Repola), jonka jälkeen vuonna 2003 päätettiin perustaa John Deeren ja Outokummun Metallin yhteisyrittäjä Waratah OM Oy. Alla olevassa kuviossa 1 on esitetty yrityksen historian merkittävimmät käänneet. [2.]



Kuvio 1 Waratah OM Oy historia [1; 3.]

Waratah OM Oy:n valmistamista harvesteripäistä suurin osa päättyy John Deere Forestry Oy:n valmistamiin metsäkoneisiin, mutta yritys valmistaa samoja harvesteripäitä myös Waratah-tuotemerkillä myytäväksi asiakasyrityksille. Harvesteripäitä valmistetaan Suomessa ja Uudessa-Seelannissa. Waratah New-Zealand on täysin John Deeren omistuksessa. [2.]

Suomessa yrityksen tuotantoketju alkaa Outokummusta, jossa suoritetaan harvesteripäiden koneistukset, hitsaukset, maalaus ja mekaaninen kokoonpano. Tämän jälkeen harvesteripäiden aihiot kuljetetaan Joensuuun Waratah OM Oy:n tiloihin, jossa niille suoritetaan loppukokoonpano sekä testaus. [1.]

John Deere Forestry vastaa harvesteripäiden (kuva 1) asentamisesta harvesterikoneisiin sekä suorittaa lopullisen testauksen ja tarvittavat viimeistelyvaiheet. Lisäksi se vastaa Waratah-tuotemerkin harvesteripäiden myynnistä. [4.]



Kuva 1 Waratah OM Oy:n valmistama H412 harvesteripää [4.]

1.3 Opinnäytetyön toimeksianto

Opinnäytetyön toimeksiantona oli suunnitella mittauslaitteisto, jonka avulla pystyttäisiin mittaamaan harvesteripään karsintateriin kohdistuvia voimia ja arvioimaan eri profiilien soveltuvuutta karsintatilanteeseen. Harvesteripäissä on käytössä useita erilaisia teräprofiileita, joista jokainen käyttäytyy karsintatapahtuman aikana hieman eri tavalla.

Tarkoituksena oli, että suunnitellun laitteiston avulla mitattuja tuloksia voitaisiin hyödyntää tulevaisuuden jatkotutkimuksissa ja karsintaterien suunnittelussa.

Suunniteltavan mittauslaitteiston avulla myös eri teräprofiilien soveltuvuutta niiden käyttötarkoitukseen voitaisiin tutkia, ja tutkimustuloksien perusteella pystyttäisiin tekemään johtopäätöksiä, mihin käyttöön mikäkin teräprofiili soveltuisi parhaiten.

Tutkimuksia karsinnan aikana esiintyvistä voimista oli aiemmin tehty hyvin vähän, joten opinnäytetyössä tukeuduttiin vain muutamaankin karsintavoimiam käsittelevään tutkimukseen. Waratah OM Oy toimitti suunnitteluprosessin alussa aiheeseen liittyvän diplomityön suunnittelun tueksi.

1.4 Opinnäytetyön rajaus

Opinnäytetyölle asetettiin toimeksiantajan puolelta muutamia reunaehtoja, joiden mukaan tuotekehitysprojekti eteni. Näitä olivat muun muassa suunniteltavan mittauslaitteen mekaniikkaan ja voimantuottoon liittyvät rajaukset.

Suunniteltavan mittauslaitteiston voimantuotto sovittiin hydraulikäyttöiseksi, sillä yritykseltä löytyi jo valmiiksi laitteeseen soveltuva hydraulikoneikko. Lisäksi hydraulikoneikon yhteyteen oli aiemmin rakennettu teräsrakenteinen suljettu tila, jonka sisälle suunniteltava mittauslaitteisto oli tarkoitus sijoittaa. Mittauslaitteiston ulkomittoja rajaaviksi tekijöiksi muodostuivat siis suljetun tilan sisämitat.

Vaatumuksena opinnäytetyölle oli, että suunniteltavasta mittauslaitteistosta tuli piirtää osa-, hitsaus- ja kokoonpanopiirustukset myöhempää valmistusta varten. Valmistuspiirustukset päätettiin jättää opinnäytetyöprosessin ulkopuolelle, joten niitä ei sisällytetty raporttiin.

1.5 Opinnäytetyön tavoitteet

Mittauslaitteiston suunnittelun tavoitteiksi asetettiin Waratah OM Oy:n toimesta pääasiassa mittaustapahtumaan vaikuttavia asioita. Näistä kriittisin oli mittaustapahtuman toistettavuus, joka oli huomioitava laitteiston rakennetta

suunnitellessa. Mittauslaitteistosta aiheutuvat karsintavoimaan vaikuttavat tekijät pyrittiin minimoimaan perusteellisella suunnittelulla.

Mahdollisimman realistisen mittaustuloksen saavuttamiseksi oli suunnitteluprosessia varten etsittävä puun leikkaantumiseen ja karsintaan liittyvää kirjallisuutta sekä tutkimustuloksia. Näitä pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman paljon suunnitteluprosessin aikana.

Tavoitteena oli myös suunnitella mittauslaitteistosta standardienmukainen, turvallinen sekä ympäristöystävällinen. Suunnittelutyössä hyödynnettiin yleisiä ja hyväksi todettuja alan standardeja.

2 Tuotekehitystoiminta

Tuotekehitystoiminnasta puhuttaessa tarkoitetaan yleensä jonkin tuotteen tai palvelun suunnittelemista tai kehittämistä. Sen avulla pyritään kehittämään joko jo olemassa olevia tuotteita tai palveluita, tai luomaan täysin uusia tuotteita markkinoille. [5, 13.] Tuotekehitystoimintaa voi olla myös esimerkiksi jonkin järjestelmän sovittaminen uuteen käyttötarkoitukseen. [6, 10.]

2.1 Yleistä tuotekehitystoiminnasta

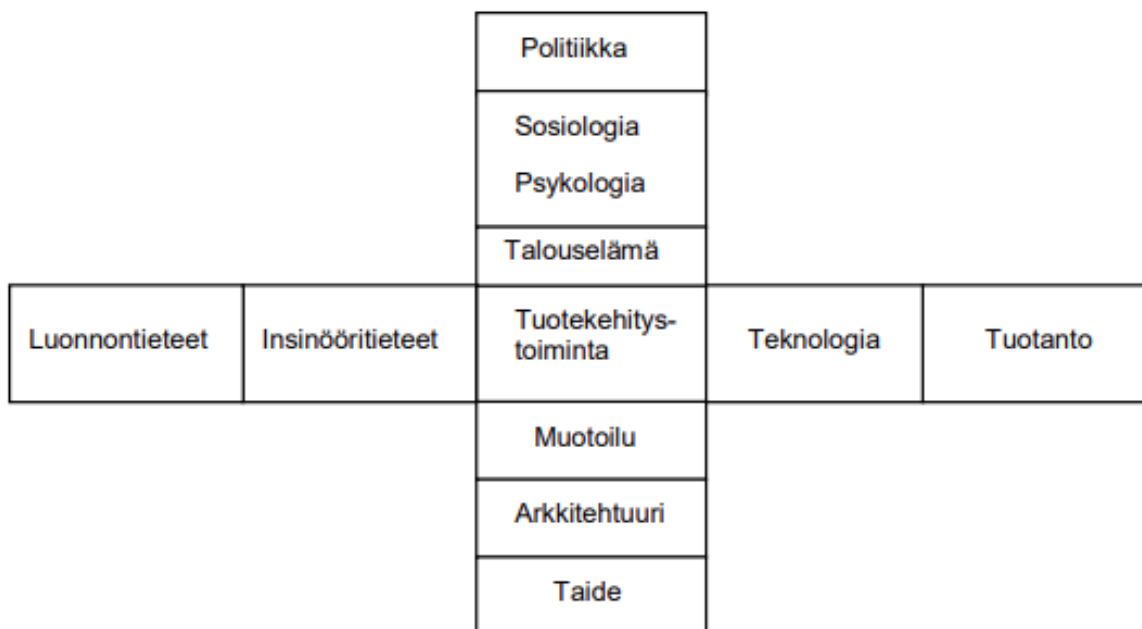
Hyvin usein tuotekehitystoiminnan taustalla on tarve, jolla pyritään ratkaisemaan jokin ongelma tai ongelmia. Ongelmat voivat liittyä joko arkipäiväiseen elämiseen tai esimerkiksi johonkin teollisuudessa esiintyvään ongelmaan. Päälimmäisenä ajatuksena tuotekehitystoiminnalla on tarkoitus edistää teknologiaa ja samalla helpottaa jonkin asian tekemistä. [5, 18.]

Usein tuotekehitys tapahtuu projektiluontoisena, ja projektiin osallistuu monien eri alojen osaajia, jotta pystytään huomioimaan kaikki tuotteen elinkaareen liittyvät asiat kehitystoiminnan aikana. Aiemmin tuotekehitystoiminta ohjautui vastaan tulleiden tilanteiden seurauksena, mutta nykyään tuotantoprosessi ja markkinointi ovat vahvasti liitettyinä tuotekehitykseen. [6, 10–11.]

Tuotekehitys on monivaiheinen prosessi ja pitää sisällään monia eri osa-alueita. Edellytyksenä kehitysprosessin aloittamiselle on tuoteidean etsiminen ja löytäminen. Kehitysprosessin alkuvaihe sisältää tavallisesti paljon tiedon etsintää sekä selvittämistä. Selvittämisen kohteita voivat olla esimerkiksi tuotteen markkinoiden tai kehitysnäkymien kartoittaminen. Prosessin aikana etsitään useaan kertaan erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja sekä tehdään luonnoksia suunniteltavasta tuotteesta. Tuotekehitys vie usein paljon aikaa, ja myös sen kustannukset voivat nousta korkeiksi. Tämän vuoksi projekti kannattaa aikatauluttaa etukäteen ja suunnitella huolellisesti. [7.]

Yrityksen näkökulmasta onnistunut tuotekehitystoiminta on edellytys yrityksen menestymiselle. Menestyäkseen tuotekehityksen saralla on organisaation onnistuttava monella eri osa-alueella. Nykypäivänä yhä tärkeämpää tuotekehityksessä on asiakaslähtöinen toiminta, joka huomioi asiakas- ja markkinatarpeet. Mitä nopeammin asiakastarpeisiin pystytään vastaamaan, sitä paremmat mahdollisuudet yrityksellä on menestyä. Myös laadun käsite on viime vuosikymmenien aikana tullut tuotekehityksen kannalta entistäkin tärkeämmäksi, sillä sen tuoma arvo tuotteelle on merkittävän suuri. [8.]

Muita vaikuttavia tekijöitä tuotekehityksessä menestymiseen ovat ohjauksen ja operatiivisen toiminnan kyvykkyys, motivoitunut henkilöstö, arvonluonti organisaation yhteistyöllä ja pitkäjänteisyys. [8.] Tuotekehityksessä tarvitaan niin luonnontieteitä kuin myös kykyä luovaan työskentelyyn (kuva 2). Lisäksi toimintaympäristön on oltava mahdollisimman innovatiivinen ja kannustava. [6, 10.]



Kuva 2 Tuotekehitystoiminta [6, 10.]

2.2 Prosessimallit suunnittelun apuna

Tuotekehityksessä ei ole ainoata oikeaa tapaa, vaan lähestymistapoja on lukuisia. Kaikille tuotteille ei välttämättä sovellu sama prosessimalli, vaan on löydettävä juuri kyseiselle tuotteelle sopivin malli. Usein yrityksen sisällä on käytössä jokin tietty tuotekehityksen prosessimalli, etenkin jos yrityksen tuotteet ovat samankaltaisia. Monesti prosessimalli rakentuu jonkin tunnetun mallin pohjalle, mutta sitä on mahdollisesti sovellettu yrityksen omiin tarpeisiin nähden sopivaksi. [9.]

Yleensä tuotekehitysprosesseista on erotettavissa niiden tyyppi. Näitä voivat olla esimerkiksi teknologiatyöntöprosessi, markkinavetoinen prosessi, paranteluprosessi tai räätälöintiprosessi. Teknologiatyöntöprosessilla tarkoitetaan teknologialähtöistä prosessia, jossa innovaatiolle pyritään luomaan markkinat.

Tyypillisin tuotekehitysprosessin tyyppi on markkinavetoinen prosessi, jossa taustalla on tunnistettu tarve. Paranteluprosessista puhuttaessa tarkoitetaan prosessia, jossa parannellaan jo olemassa olevaa tuotetta. Räätälöintiprosessilla tarkoitetaan asiakkaan tilauksen mukaista suunnitteluprosessia, jossa

suunnittelu ohjautuu asiakkaan asettamien toiveiden ja vaatimuksien mukaan. [5, 45.]

Tuotekehityksessä on tänä päivänä käytössä useita eri prosessimalleja, joiden avulla suunnittelussa voidaan edetä. Tunnetuimpia prosessimalleista ovat muun muassa:

- Ulrich & Eppinger
- VDI 2221
- Stage-Gate Process
- Vesiputousmalli
- Lean.

Tuotekehityksessä yleisesti käytetyimmät ja suosituimmat prosessimallit sisältävät monesti useita samoja piirteitä ja prosessin vaiheita. Tyypillisiä piirteitä näille prosessimalleille ovat muun muassa [5, 46.]:

- tarpeen tunnistaminen
- ongelman määrittely
- synteesi
- analyysi
- optimointi
- testaus
- tuotannon käynnistäminen
- arviointi.

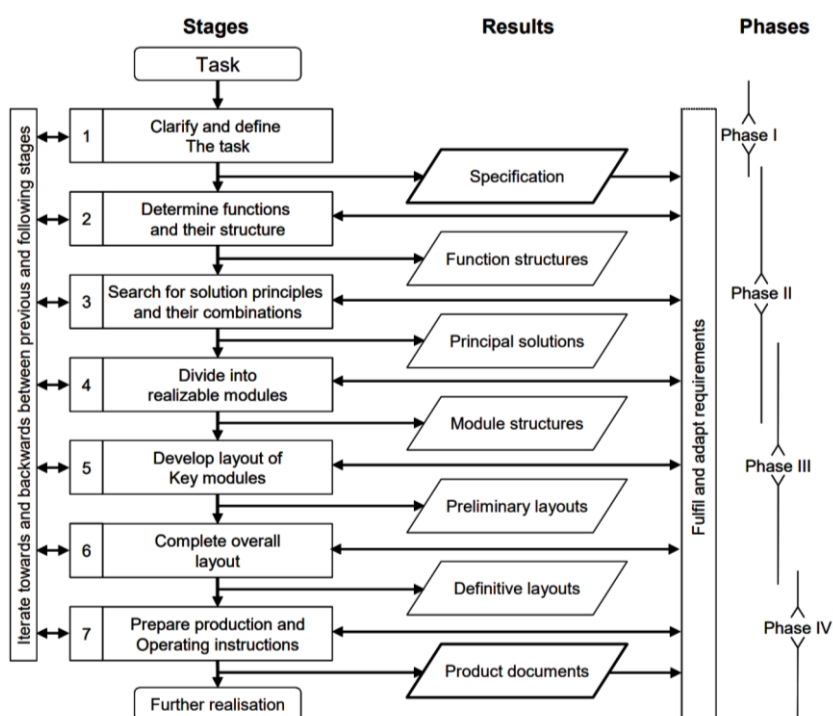
3 Systemaattinen suunnittelumetodi VDI 2221

VDI 2221 -standardi on Saksan insinööriliiton kehittämä systemaattinen kehitys- ja suunnittelumalli, joka on suunnattu teknisten järjestelmien sekä tuotteiden suunnitteluun. Kyseinen standardi on ilmestynyt vuonna 1993, jolloin se korvasi edeltäjänsä VDI 2222 -standardin (1973). [10.]

Standardia käytetään tavallisesti suunnittelun tukena, jolloin suunnitteluprosessin systemaattisuus on helpompi säilyttää. Sen hyödyntämisen myötä myös

työskentelytavat ovat tehokkaampia. VDI 2221 -standardia laadittaessa on otettu huomioon laajempi lähestymistapa, joten standardi soveltuu käytettäväksi eri alojen kuten kone-, elektroniikka- ja ohjelmistosuunnittelun prosesseissa. [11, 47–50.]

VDI 2221:n mukainen ohje (kuva 3) voidaan jakaa neljään eri päävaiheeseen, joita ovat tehtävän selvittely, luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely. Jokainen vaiheista pitää sisällään niin sanottuja merkkipaaluja, joiden suorittamisen jälkeen voidaan siirtyä seuraavaan suunnitteluprosessin vaiheeseen. [11, 48.]



Kuva 3 VDI 2221:n mukaiset työvaiheet [10, 49.]

VDI 2221:n mukaisen suunnitteluprosessin tuloksena syntyvät dokumentit ovat aikajärjestyksessä:

- vaatimuslista
- toimintorakenne
- periaatteellinen ratkaisu
- modulaarinen rakenne
- esisuunnitelmia
- konstruktioehdotus
- tuotedokumentaatio.

3.1 Tehtävän selvittely

3.1.1 Tiedonhankinta

Ensimmäisenä päävaiheena VDI 2221 -standardissa on tehtävän selvittely, joka pitää sisällään kaikenlaisen informaation hankintaa. Tyypillisesti informaatiota saadaan selvittämällä kehityksen kohteelle asetettuja vaatimuksia ja toivomuksia, sekä selvittämällä mitkä ovat suunnittelun reunaehdot. Kun tehtävän selvittely tehdään alusta alkaen laajamittaisesti ja täydellisesti saavutetaan monia etuja. Tällöin esimerkiksi suunnitteluprosessi helpottuu merkittävästi, ja tarvittavat täydennykset ja korjaukset kohdistuvat tuotteen kannalta merkittävimpiin kohteisiin. [11, 62–63.]

Tehtävän selvittelyn tarve voi tulla kehitystehtävänä, konkreettisena tilauksena tai perustua virikkeeseen. Kehitystehtävä voi tulla oman yrityksen sisältä, mutta myös sen ulkopuolelta. Konkreettiset tilaukset tulevat tyypillisesti yrityksen asiakkailta, ja niissä suunnittelua ohjaavat asiakkaan toiveet ja vaatimukset. Virikkeenä tuleva selvittelyn tarve voi tulla esimerkiksi kritiikin, palautteen tai parannusehdotuksen muodossa. [11, 63.]

3.1.2 Vaatimusluettelo

Kerätyn informaation pohjalta laaditaan vaatimusluettelo, johon yhdistetään kaikki kerätty oleellinen informaatio ja suunnitteluprosessin kannalta välttämätön tieto. Tehtävän selvittelyvaiheessa laadittua vaatimusluetteloä käytetään informaationa seuraavissa suunnitteluprosessin vaiheissa. [11, 64.]

Kerättyä informaatiota kannattaa aina tulkita myös kriittisesti, sillä jossakin tapauksissa tuotekehitysprosessin alussa määritetyistä vaatimuksista saattaa olla jopa haittaa, mikä voi johtaa siihen, ettei parhainta mahdollista tulosta saavuteta. Kannattaa siis aina varmistaa, että asetetut vaatimukset ovat aivan välttämättömiä. Ainoastaan tulo- ja lähtösuureet sekä rajoitukset kannattaa lyödä lopullisesti lukkoon vaatimusluetteloä laatiessa. [11, 64–68.]

Ennen seuraavaan vaiheeseen siirtymistä on päätöksentekovaihe, jossa käydään läpi vaatimuslistaan kerättyä informaatiota ja peilaillaan sitä eri kysymysten avulla. Näitä voivat olla esimerkiksi [11, 71.]:

- Onko tehtävänasettelussa edetty tarpeeksi pitkälle?
- Onko tietoa hankittava vielä lisää?
- Onko luonnosteluvaihe välttämätön?
- Kuinka laaja luonnosteluvaiheen on oltava?

3.2 Luonnostelu

Luonnosteluvaihe pitää sisällään useita eri työvaiheita, joiden avulla pyritään tunnistamaan ongelmia, kehittämään niihin erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja ja yhdistelemällä ratkaisuvaihtoehtoja kokonaisuuksiksi. Luonnostelun avulla pyritään luomaan ja vahvistamaan periaatteita. [11, 71–72.]

VDI 2221:n mukaiset luonnosteluvaiheen työvaiheet ovat [11, 72.]:

1. Abstrahointi oleellisten ongelmien tunnistamiseksi
2. Toimintorakenteen esittäminen (kokonaistoiminto ja osatoiminnot)
3. Vaikutusperiaatteiden haku osatoimintojen toteuttamista varten
4. Vaikutusperiaatteiden yhdistäminen vaikutusrakenteeksi
5. Sopivimpien yhdistelmien valinta
6. Periaatteellisten ratkaisumuunnelmien konkretisointi
7. Arvostelu teknisten ja taloudellisten kriteerien mukaan
8. Periaatteellisen ratkaisun vahvistaminen.

3.2.1 Abstrahointi

Yhtenä luonnostelun välineenä käytetään abstrahointia. Abstrahoinnista puhuttaessa tarkoitetaan yleispätevöittämistä ja yksiselitteistämistä. Sen avulla pyritään keskittymään vain olennaiseen ja löytämään tehtävän ydinolemus. Abstrahoinnin apuna käytetään tehtävän selvittely -vaiheessa laadittua vaatimusluetteloa. [11, 74.]

Abstrahoinnin keinoja ovat muun muassa [11, 74.]:

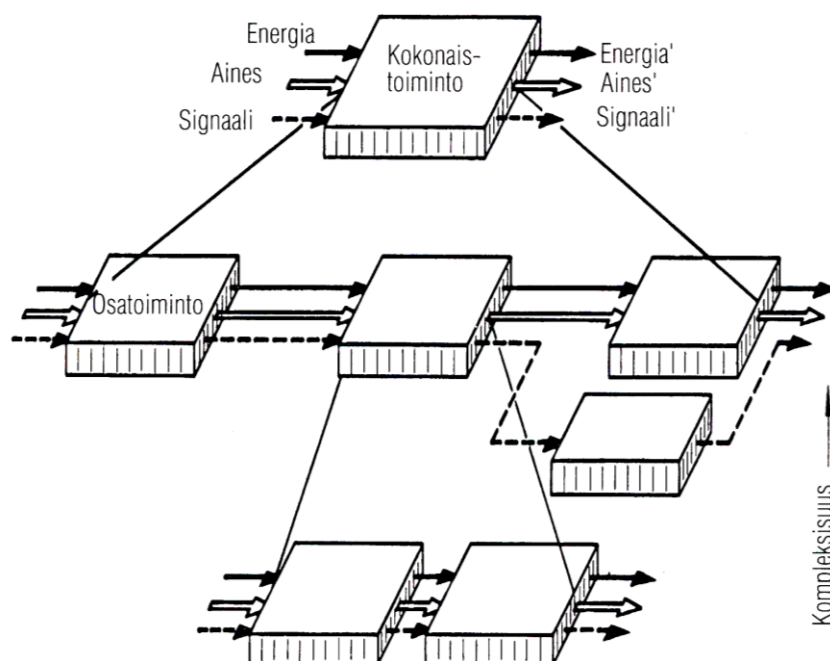
- toivomuksien jättäminen pois
- toimintaa tai oleellisia ehtoja koskemattomien vaatimusten karsiminen
- määrällisten toteamuksien muuttaminen laadullisiksi
- aiemman informaation laajentaminen
- ongelman muotoilu ratkaisuun nähden neutraalisti.

Vaikka luonnosteluprosessi aloitetaankin tavallisesti vaatimusluettelon pohjalta, on tärkeää etsiä ratkaisuja myös sen ulkopuolelta. Vaatimusluettelo itsessään antaa usein syvällisen katsauksen ongelmista, mutta liika takertuminen vaatimukseen ja toivomukseen saattaa jopa estää parhaimman mahdollisimman tuloksen saavuttamisen. Joskus vaatimusluettelossa olevat vaatimukset eivät kohdistu millään tavalla laitteen tai tuotteen toimintaan. Tällöin niiden jättämistä prosessin ulkopuolelle kannattaa pohtia kriittisesti abstrahoinnin avulla. [11, 80.]

Myöskin kokemustietoon perustuvista ennakkoluuloista ja tottumuksista luopuminen saattavat auttaa uusien parempien ratkaisujen kehittämisessä. Varsinkin uutta tuotetta kehittäessä on hyvä pitää kaikki tiet avoinna erilaisille ratkaisuehdotuksille. [11, 73.]

3.2.2 Toimintorakenteen suunnittelu

Toimintorakenteen suunnittelu kuuluu osaksi luonnosteluvaihetta ja sen avulla on tarkoitus kuvata kokonaistoimintoa eli laitteen päätoimintoa yksiselitteisesti. Kokonaistoiminto voidaan esittää lohkokaaavion muodossa (kuva 4), edellyttäen kuitenkin sitä, että kokonaistehtävä on muotoiltu abstrahointivaiheessa ydinolemuksensa mukaan. [11, 81.]



Kuva 4 Toimintorakenne kokonais- ja osatoimintoineen [11, 82.]

Kokonaistoiminto jaetaan osatoimintoihin, joiden avulla kuvataan erillisiä osasysteemejä. Osatoimintoja on tarvittaessa mahdollista jakaa vielä pienempiin osiin, joka on kannattavaa silloin kun osatoiminnot ovat monimutkaisia. [11, 82.] Toimintorakenteen laatimisen myötä eri osasysteemien erittely ja kehittäminen helpottuu. Lisäksi ajankäyttö paranee ja kustannuksissa voidaan säästää. [11, 83.]

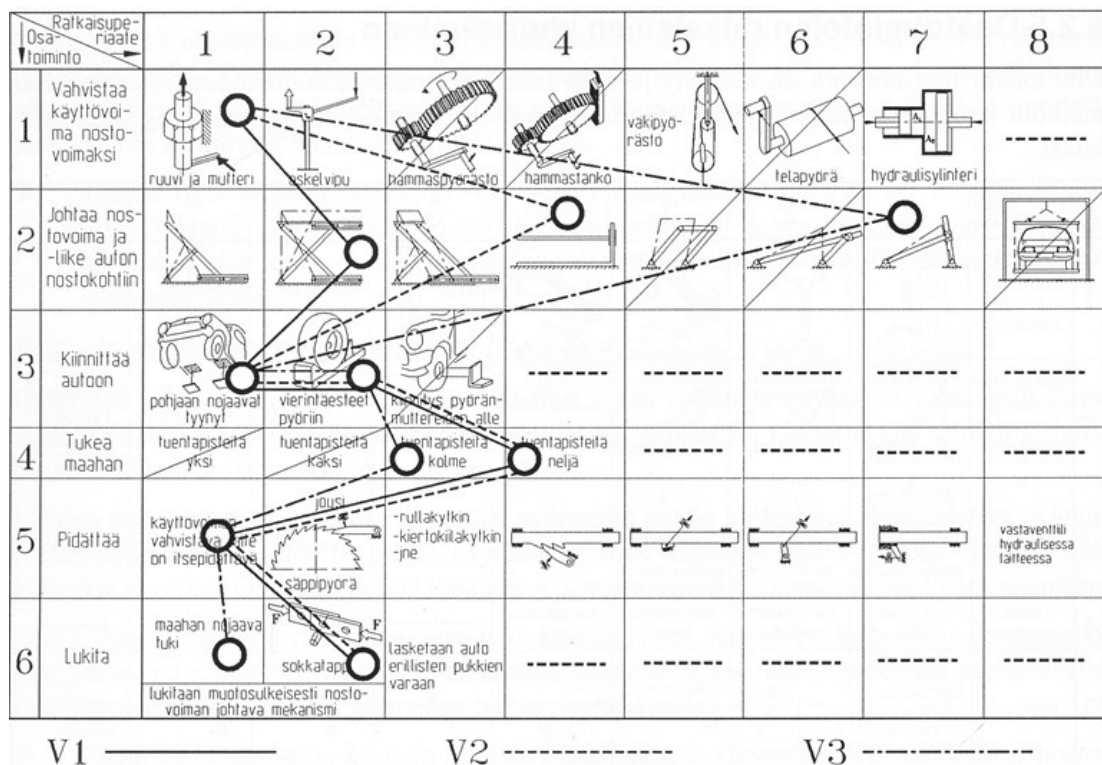
3.2.3 Vaikutuseriaatteiden ideointi ja niiden yhdistäminen

Toimintorakenteen laatimista VDI 2221 -standardissa seuraa osatoimintojen eri ratkaisuvaihtoehtojen eli vaikutuseriaatteiden ideointi. Jokaiselle osatoiminnolle pyritään luomaan useita eri ratkaisuvaihtoehtoja, jotka sisältävät toiminnon toteuttamista varten tarvittavat ominaispiirteet (fysikaaliset ilmiöt, geometriset ja aineelliset tunnusmerkit). [11, 99.]

Ratkaisuperiaatteiden ideointi voi pohjautua jo olemassa olevaan tietoon tai uusia ideoita voi syntyä matkanvarrella. Olemassa olevaa informaatiota ratkaisuperiaatteiden ideointiin voi etsiä kirjallisuudesta, tutkimuksista, luonnon

järjestelmässä esiintyvistä ratkaisuista, tunnetuista teknisistä ratkaisuista tai aiemmin tehdyistä mittauksista ja kokeista. Informaatiota jatkojalostamalla on mahdollista päästä parhaaseen mahdolliseen tulokseen. [11, 99.]

Kun jokainen osatoiminto on käsitelty ja ratkaisuvaihtoehtoja kehitelty tarpeeksi, voidaan siirtyä yhdistelemään ja jäsentelemään osatoimintoja kokonaisuuksiksi morfologisen laatikon (kuva 5) avulla. Ennen tätä kannattaa kuitenkin pohtia kriittisesti eri ratkaisuvaihtoehtojen soveltuvuutta sekä toimivuutta, ja tarvittaessa jättää osa niistä prosessin ulkopuolelle. [12, 89.]



Kuva 5 Morfologinen laatikko [12, 89.]

Vaikutusperiaatteiden yhdistäminen vaikutusrakenteeksi ei ole aina yksinkertainen prosessi, vaan osatoiminnoille voi olla ideoitu useita hyviä ratkaisuehdotuksia. Tyypillinen tapa toteuttaa osatoimintojen ratkaisuehdotuksien yhdistely on valita jokaisesta osatoiminnosta mielenkiintoisimmat ja rationaalisimmat ratkaisuvaihtoehdot. Tämän jälkeen niitä yhdistelemällä luodaan sopiva määrä vaikutusrakenteita. Näiden yhdistelmien on oltava konkreettisesti toteutettavissa ja mahdollisimman järkeviä. [12, 96.]

3.2.4 Ratkaisumuunnelmien valinta ja pisteytys

Luotujen ratkaisumuunnelmien arviointi on koko suunnitteluprosessin kannalta tärkeää, sillä tällä tavoin voidaan selvittää, miten hyvin ne vastaavat asetettuja vaatimuksia. Yksinkertainen ja toimiva metodi ratkaisumuunnelmien arvosteluun on valintalista (kuva 6). [11, 140.]

Valintalistaan kootaan suunnitteluprosessin aikana laadittuja dokumentteja ja listataan vaatimusluettelon tärkeimpiä kriteereitä. Tämän jälkeen listaan merkitään kuvan 6 mukaisesti, kuinka hyvin eri ratkaisumuunnelmat täyttävät asetetut vaatimukset. [12, 90.]

Valintalistan avulla päätetään myös, kehitetäänkö ratkaisumuunnelmia eteenpäin, karsitaanko muunnelma kokonaan pois vaihtoehdoista, tarvitaanko muunnelmaan lisää informaatiota tai onko vaatimuslistaa täydennettävä. Valintalissassa voidaan myös tarvittaessa kommentoida ja perustella tehtyjä ratkaisuja. [11, 133.]

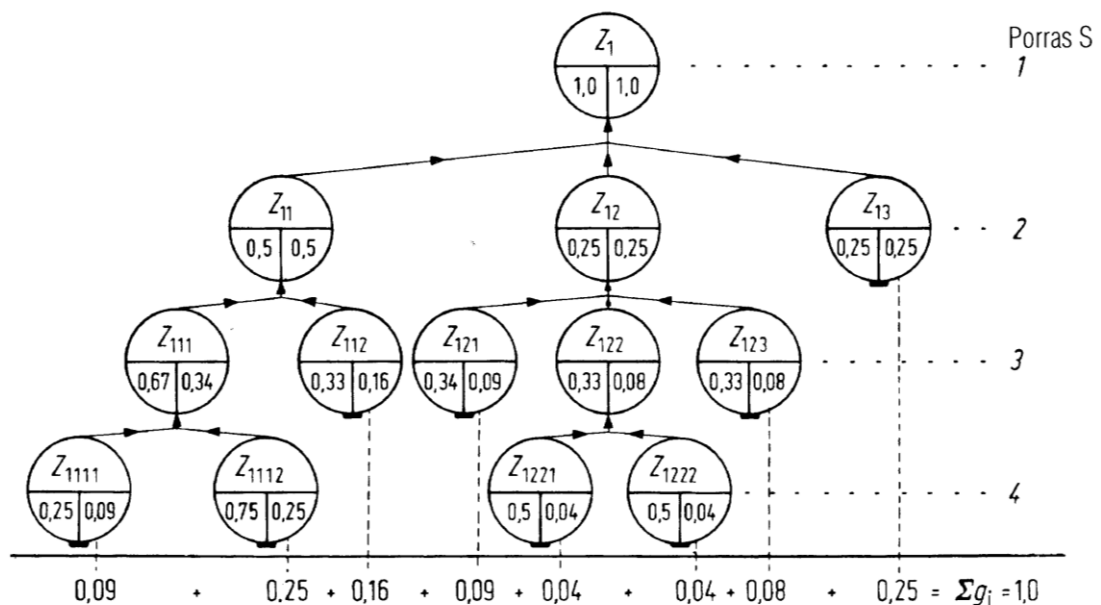
| | | Valintakriteerit: | | | | | | Päätökset: | |
|------------------|---|--|---|---|---|---|--|---|--|
| | | (+) kyllä (-) ei (?) tiedon puute (!) vaatimuslista tarkistettava | | | | | | (+) kehitetään eteenpäin (-) karsitaan (?) hankitaan lisää tietoa (!) muutetaan vaatimuslistaa | |
| Ratkaisuvalinnat | Tehtävän asetusta vastaava | | | | | | | | |
| | Toteutuskelpoisuus hyvä | | | | | | | | |
| | Täyttää kiinteät vaatimukset | | | | | | | | |
| | Kustannukset sallituissa rajoissa | | | | | | | | |
| | Valittomat turvallisuusvaatimukset täyttävä | | | | | | | | |
| | Helppo käyttää | | | | | | | | |
| | Huomautukset, perustelut | | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | | | |
| V1 | + | + | + | ? | + | + | | + | |
| V2 | + | + | + | ? | + | + | | + | |
| V3 | + | + | + | + | + | + | | + | |
| V4 | + | ? | + | + | ? | - | Nostovaihe vaikea ja aikaa vievä | - | |
| V5 | + | - | + | ? | + | + | Tarvittava nostovoima alkuvaiheessa suuri (-> järeä rakenne -> tilaongelmia) | - | |
| V6 | + | - | + | - | + | + | | - | |

Kuva 6 Ratkaisumuunnelmien valintalista [12, 90.]

Jotta lopullinen päätös luonnoksista voitaisiin tehdä, tarvitsee niitä jatkojalostaa konkreettisempaan muotoon. Tällä tavoin voidaan myös varmistua siitä, että valintalistan avulla tehdyt päätökset ovat oikeita. [12, 91.]

Useimmiten toimintorakenteen pohjalta kehitetyt ratkaisumuunnelmat painottuvat teknillisen toiminnon toteuttamiseen. Kokonaisuuden kannalta valintoja tehtäessä on tärkeää huomioida kokonaisvaltaisesti myös talouteen, turvallisuuteen, ergonomiaan, kuljetukseen ja käyttöön liittyviä kriteereitä. [11, 140.]

Pisteytykseen perustuva ratkaisumuunnelmien arviointimetodi on usein toimiva ratkaisu, kun halutaan varmistua siitä, että tehdyt valinnat perustuvat objektiiviseen päätöksentekoon. Tavoitteille ja niiden osakriteereille asetetaan painokertoimet. Kun jokaisen tavoitteen painokertoimet kerrotaan keskenään, saadaan varsinainen painoarvo. Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty tavoitteiden painokertoimien määrittäminen VDI 2221:n mukaan. [11, 140.]



Kuva 7 Tavoitteiden painokertoimien määrittäminen [11, 143.]

Jotta ratkaisumuunnelmat saataisiin pisteytettyä, käytetään apuna pisteytystaulukkoa (kuva 9). Jokainen ratkaisumuunnelma pisteytetään arvostelukriteereihin nähden ja lopuksi kerrotaan edellisen työvaiheen painokertoimella. Eri

ratkaisumuunnelmien arvostelupisteet ja painotetut arvot lasketaan yhteen, jolloin saadaan lopputuloksena kokonaispisteet. [11, 142–143.]

| Arvo | Merkitys | Arvo | Merkitys |
|------|-----------------|------|------------------------|
| 0 | sopimaton | 6 | hyvä, pieniä puutteita |
| 1 | puutteellinen | 7 | hyvä ratkaisu |
| 2 | vaikea ratkaisu | 8 | erittäin hyvä |
| 3 | hyväksyttävä | 9 | yli tavoitteen |
| 4 | riittävä | 10 | ideaaliratkaisu |
| 5 | tydyttävä | | |

Kuva 8 Arvostelupisteiden merkitys [12, 94.]

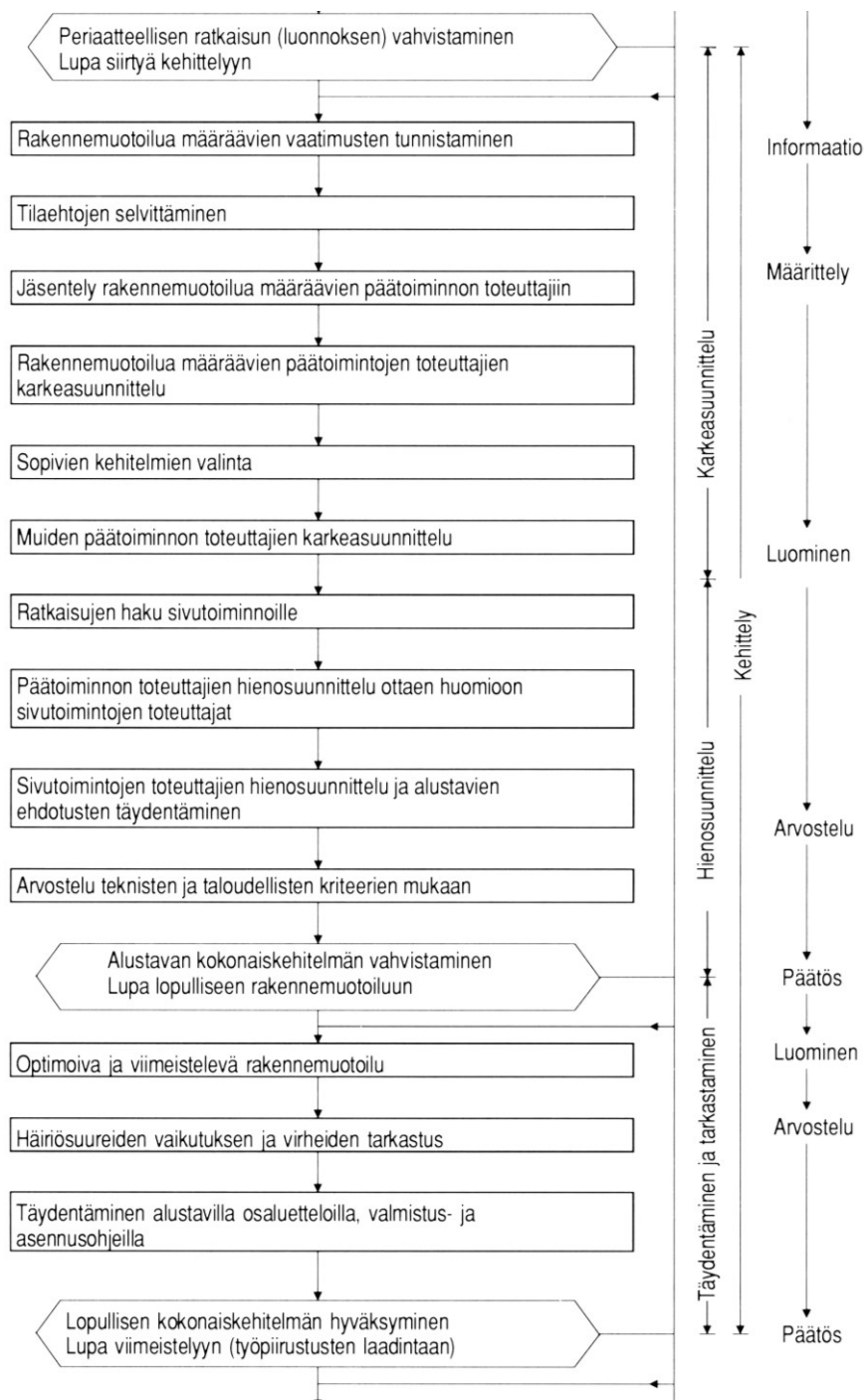
| Arvostelukriteerit | Painokerroin g_i | Vaihtoehto V1 | | Vaihtoehto V2 | | Vaihtoehto V3 | |
|--------------------------------------|--------------------|--|--|--|----------------|---------------|----------------|
| | | Arvo w_j | Arvo $g_i w_j$ | Arvo w_j | Arvo $g_i w_j$ | Arvo w_j | Arvo $g_i w_j$ |
| Toteutustapa yksinkertainen | 0,03 | 6 | 0,18 | 7 | 0,21 | 8 | 0,24 |
| Vähän kuluvia osia | 0,04 | 5 | 0,20 | 7 | 0,28 | 7 | 0,28 |
| Vähän ulkoisia häiriöitä | 0,03 | 5 | 0,15 | 6 | 0,18 | 6 | 0,18 |
| Korkea mekaaninen varmuus | 0,15 | 6 | 0,90 | 6 | 0,90 | 6 | 0,90 |
| Käyttäjistä riippumaton turvallisuus | 0,15 | 7 | 1,05 | 7 | 1,05 | 6 | 0,90 |
| Yksinkertainen osien valmistus | 0,14 | 6 | 0,84 | 6 | 0,84 | 7 | 0,84 |
| Yksinkertainen asennus | 0,06 | 6 | 0,36 | 6 | 0,36 | 8 | 0,48 |
| Ei haittaa työskentelyä | 0,12 | 8 | 0,96 | 8 | 0,96 | 8 | 0,96 |
| Helppo käyttää | 0,12 | 6 | 0,72 | 6 | 0,72 | 6 | 0,72 |
| Säilytys helppo | 0,06 | 6 | 0,36 | 5 | 0,30 | 7 | 0,42 |
| Halpa | 0,10 | 2 | 0,20 | 2 | 0,20 | 4 | 0,40 |
| | $\Sigma g_i = 1,0$ | $\Sigma w_j = 63$ $\Sigma g_i w_j = 5,92$ | $\Sigma w_j = 66$ $\Sigma g_i w_j = 6,00$ | $\Sigma w_j = 73$ $\Sigma g_i w_j = 6,32$ | | | |

Kuva 9 Ratkaisumuunnelmien pistearvostelu [12, 94.]

Laskettujen kokonaispisteiden avulla on mahdollista arvioida ratkaisumuunnelmien paremmuutta ja valita, mitä ratkaisuvaihtoehtoa jatkojalostetaan eteenpäin kehittelyvaiheessa. Laskennassa käytettävien arvostelupisteiden merkitykset on esitetty kuvassa 8. [12, 93–94.]

3.3 Kehittely

Suunnitteluprosessin kehittelyvaihe pitää sisällään rakenteen kehittämistä vaikutusrakenteen pohjalta. Edellytyksenä kehittelyvaiheeseen siirtymiseen on luonnoksen vahvistaminen. Kehittelyssä pääpaino on konkreettisisessa rakenne-
muotoilussa, jossa tukeudutaan tavallisesti luonnosvaiheen aikaansaannoksiin. Kehittelyvaiheen työvaiheet on esitetty alla olevassa kuvassa 10. [11, 176.]



Kuva 10 Kehittelyn työvaiheet [11, 178.]

Kehittelyn työvaiheet voidaan jakaa kolmeen eri päävaiheeseen, joita ovat [11, 178.]:

- karkeasuunnittelu
- hienosuunnittelu
- täydentäminen ja tarkastaminen.

Kehittelyvaiheen työaskeleet eivät etene välttämättä samalla tavalla ja nopeudella kuin luonnosteluvaiheessa. Työvaiheet täydentävät toisiaan ja voivat vaikuttaa toisiinsa niin, että joudutaan tekemään korjaavia työaskelia. Tavallisesti eri osatoimintoja pyritään kehittämään samanaikaisesti, jolloin mahdolliset suuret muutokset pystytään ehkäisemään. [11, 176–177.]

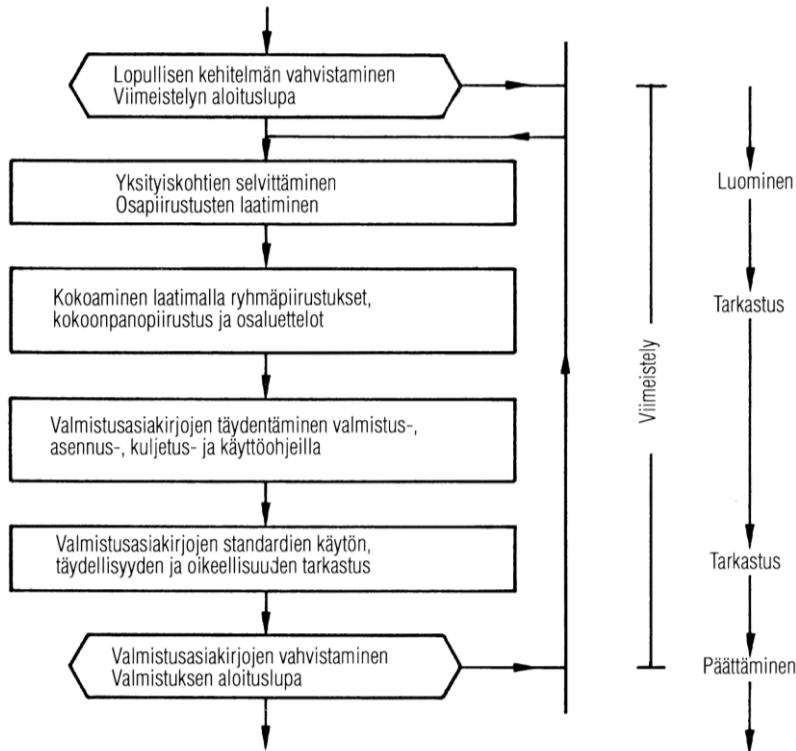
Kehittelyn tavoitteena on kehittää tuotteen rakenne yksikäsitteiseksi ja täydelliseksi niin teknisestä kuin taloudellisestakin näkökulmasta. Lisäksi pyritään saattamaan tuote siihen vaiheeseen, että jäljelle jäävät ainoastaan tuotteen dokumentointiin sekä muiden asiakirjojen päivittämiseen liittyvät tehtävät. Siihen päästäkseen tarvitaan paljon yksityiskohtaisen tiedon hankintaa ja kehittelyä. [11, 176.]

Useiden eri luonnosten laatiminen kuuluu myös kehittelyvaiheeseen. Luonnosten kautta esimerkiksi osatoimintojen yhteensopivuuden tutkiminen, päämittojen määrittäminen ja materiaalin valinta helpottuvat. Hyödyntämällä nykyaikaisia CAD-järjestelmiä luonnostelussa ja kehittelyssä, saavutetaan monia hyötyjä. Esimerkiksi tuotteen muokkaus tarvittaessa on moninkertaisesti nopeampaa, ja viimeistelyvaiheen dokumentointi helpottuu huomattavasti. [11, 176.]

Kehittelyvaihe päättyy rakennemuodon vahvistamiseen, jossa aikaansaannoksia peilataan luonnosteluvaiheen tapaan vaatimuksiin ja tavoitteisiin. Kun lopullinen päätös on tehty ja rakennemuoto vahvistettu, voidaan siirtyä viimeistelyvaiheeseen. [11, 180.]

3.4 Viimeistely

Viimeistelyvaiheessa tekeminen painottuu valmistusdokumenttien laadintaan. Lisäksi sen aikana laaditaan myös muita tarvittavia tuotedokumentteja, kuten käyttö-, huolto- ja kunnossapito-ohjeita. VDI 2221 -standardin mukaisen viimeistelyvaiheen työaskeleet on esitetty kuvassa 11. [11, 458.]



Kuva 11 Viimeistelyn työvaiheet [11, 459.]

Viimeistelyvaihe alkaa suunnittelulla, jossa kokoonpanorakennetta täydennetään lopullisilla määräyksillä. Näitä voivat olla muun muassa tuotteen mitoitus, pinnanlaatuun, valmistusmahdollisuuksiin tai kustannuksiin liittyvät tekijät. Vaikka viimeistelyvaihe pitää sisällään vähemmän työvaiheita kuin esimerkiksi kehittämissä vaiheissa, voidaan silti joutua palaamaan työaskelissa taaksepäin ongelmien ilmetessä. [11, 458–459.]

Kun tuotteen suunnitteluun liittyvät yksityiskohdat on selvitetty, voidaan viimeistelyssä siirtyä tuotteen dokumentointiin. Valmistuksen suunnittelu ja sen ohjaus tuotantoon voidaan tehdä viimeistelyvaiheen dokumenttien pohjalta, jos niiden laatiminen ja päivittäminen on suoritettu asianmukaisesti. Helpottaakseen

dokumentointiprosessia kannattaa suunnittelussa hyödyntää CAD-järjestelmiä ja päivittää dokumentteja aina sitä mukaa kun muutoksia tulee. [11, 459.]

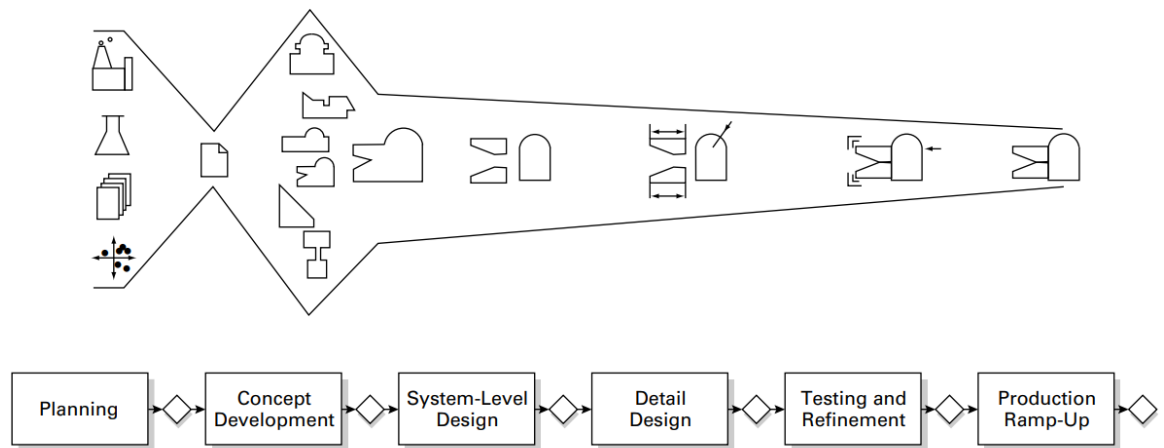
Viimeistelyvaiheen lopputuloksena valmistusmenetelmät lyödään lopullisesti lukkoon ja suoritetaan kaikki tarvittava tuotedokumentointi. Suunnittelun pohjalta tehty tuotedokumentointi käsittää osa-, osakokoonpano- ja kokoonpanopii- rustukset sekä osaluettelon, jota voidaan kehittäelyvaiheen jälkeen hyödyntää esimerkiksi tilauksien yhteydessä. [11, 459.]

Viimeistelyvaiheen tavoitteena on saattaa tuote huolellisesti valmiiksi niin, että sen tekninen toiminta on taattu ja valmistukseen, valmistusvirheisiin, kustannuksiin sekä laatuun vaikuttavat tekijät on huomioitu perinpohjaisesti. Kun kaikki edellä mainituista on hoidettu kuntoon, voidaan antaa lupa tuotteen valmistuksen aloittamiselle. [11, 458.]

4 Ulrich & Eppinger -tuotekehitysprosessi

Ulrich & Eppinger -tuotekehitysprosessin ovat kehittäneet yhdessä amerikkalaiset insinöörit Karl T. Ulrich ja Steven D. Eppinger. Menetelmän mukainen tuotekehitysprosessi koostuu kuudesta eri päävaiheesta (kuvio 2), jotka ovat suunnittelu, konseptin kehittäminen, järjestelmätason suunnittelu, yksityiskohtainen suunnittelu, testaus ja viimeistely sekä tuotannon käynnistäminen. [13, 13–16.]

Jokaista prosessin vaihetta seuraa niin sanottu portti, jossa tarkastellaan aikaansaannoksia ja koostetaan yhteenveto vaiheen aikaansaannoksista. Näiden jälkeen arvioidaan tilannetta ja päätetään, ollaanko valmiita siirtymään seuraavaan suunnitteluprosessin vaiheeseen. [5, 47.]



Kuvio 2 Ulrich & Eppinger -tuotekehitysprosessin vaiheet [13, 14.]

4.1 Tehtävän selvittäminen

Tuotekehitysprosessi lähtee liikkeelle varsinaisen tehtävän selvittämisestä, jossa selvitetään minkä tyyppistä tuotetta ollaan lähtemässä kehittämään. Heti alkuvaiheessa tuotteelle luodaan yksinkertainen ja lyhyt kuvaus, jota kutsutaan Ulrich & Eppinger -menetelmän mukaisesti alkusuunnittelukatsaukseksi (engl. Mission Statement). Tyypillisesti katsaus on pituudeltaan yhden A4-sivun mittainen. [5, 50.]

Alkusuunnittelukatsauksessa käydään tavallisesti läpi tärkeimpiä kehitysprosessiin liittyviä asioita, kuten lyhyt kuvaus suunniteltavasta tuotteesta, prosessin keskeisiä tavoitteita, tuotteen markkinointiin liittyviä asioita sekä prosessia rajaavia tekijöitä. Alkusuunnittelukatsaus toimii eräänlaisena ohjeena tuotekehityksen parissa työskenteleville. Ulrich & Eppinger -menetelmän mukainen alkusuunnittelukatsaus on esitetty kuvassa 12. [13, 67–68.]

| Mission Statement: Multifunctional Office Document Machine | |
|---|--|
| Product Description | <ul style="list-style-type: none"> • Networkable, digital machine with copy, print, fax, and scan functions |
| Benefit Proposition | <ul style="list-style-type: none"> • Multiple document processing functions in one machine • Connected to office computer network |
| Key Business Goals | <ul style="list-style-type: none"> • Support Xerox strategy of leadership in digital office equipment • Serve as platform for all future B&W digital products and solutions • Capture 50% of digital product sales in primary market • Environmentally friendly • First product introduction 4th Q 1997 |
| Primary Market | <ul style="list-style-type: none"> • Office departments, mid-volume (40–65 ppm, above 42,000 avg. copies/mo.) |
| Secondary Markets | <ul style="list-style-type: none"> • Quick-print market • Small “satellite” operations |
| Assumptions and Constraints | <ul style="list-style-type: none"> • New product platform • Digital imaging technology • Compatible with CentreWare software • Input devices manufactured in Canada • Output devices manufactured in Brazil • Image processing engine manufactured in both the United States and Europe |
| Stakeholders | <ul style="list-style-type: none"> • Purchasers and users • Manufacturing operations • Service operations • Distributors and resellers |

Kuva 12 Esimerkki alkusuunnittelukatsauksesta [13, 67.]

Tuotekehitysprosessin alkuvaiheessa on hyvä esittää myös muutamia perusteita sille, miksi juuri kyseinen tuote olisi järkevää kehittää, ja minkä vuoksi asiakkaat olisivat valmiita hankkimaan sen. Jo alkuvaiheessa on hyvä huomioida liiketoimintaan vaikuttavia asioita, kuten projektin aikataulu, kulut ja laatuasiat. [5, 52.]

Itse suunnittelun kannalta on tärkeä alkaa kerätä lähtötietoja, joiden perusteella tuotetta pystytään alkaa suunnitella. Selvittämisvaiheen tiedonkeräyksessä voidaan hyödyntää useita eri menetelmiä. Tyypillisimpiä tiedonkeruun menetelmiä ovat haastattelut ja asiakkaan kanssa käydyt keskustelut. [5, 59.]

Tuotekehitysprojektin käynnistämisen vaihe päättyy kehityspäätökseen, jonka hyväksymisen edellytyksinä ovat esimerkiksi tuotteen kannattavuus ja toteuttamisen mahdollisuus. Jotta kehityspäätökselle on hyvät perustelut, on asiaan liittyen tehtävä kattavia esiselvityksiä. [5, 55.]

4.2 Konseptisuunnittelu

Tuotekehitysprojektin asettamisen jälkeen siirrytään konseptisuunnittelun vaiheeseen, joka pitää sisällään asiakkaan tarpeiden tunnistamista, ideointia, luonnostelua. Konseptisuunnitteluvaiheen tuloksena syntyy tuotteen karkea luonnos, josta ilmenee tuotteen toimintaperiaate. [5, 61.]

Tuotekehityksen kannalta asiakkaiden tarpeiden tunnistaminen on hyvin tärkeää, sillä asiakkaat pystyvät antamaan kokemusperäistä informaatiota sekä kertomaan tarpeistaan sekä aiemmin esiintyneistä ongelmista. [5, 62.] Tarpeiden selvittämisessä menetelminä voidaan käyttää esimerkiksi kyselyitä, ryhmäkeskusteluita tai haastatteluja. Asiakkaan tarpeita selvitettäessä voidaan hyödyntää taulukkoa, johon saatuja tietoja kerätään. [13, 118–119.]

Ulrich & Eppinger -tuotekehitysmenetyksessä asiakkaan tarpeet muodostetaan tarvelauseiksi, joiden avulla pyritään yksinkertaistamaan asiakkaan toiveita ja vaatimuksia. Tarvelauseita syntyy usein paljon, joten niistä on osattava karsia ylimääräiset pois. Sopiva määrä tarvelauseita on noin 20 kappaletta. [5, 67.]

Kun tarvittava määrä tarvelauseita on kasassa, tuotekehitysprosessi etenee spesifikaatioiden määrittämisen vaiheeseen (kuva 13), jossa tarvelauseille määritetään niitä vastaavat tekniset ominaisuudet. Spesifikaatiossa tarvelauseille muodostetaan suure ja siihen liittyvä arvo. Suureiden arvot voivat olla joko numeerisia tai sanallisia. [5, 73.]

| Tarvelause | Spesifikaatio | Mittayksikkö |
|------------------|------------------------------------|--------------|
| Edullinen hinta | Hinta | € |
| Kevyt käyttää | Massa | g |
| Helppo puhdistaa | Pinnankarheus | Ra |
| Ergonominen | Ergonominen | Subj. |
| Kestävä | Materiaalin myötölujuus | MPa |
| Värikäs | Värien lkm | kpl |
| Säädettävä | Säädettävyyismahdollisuuksien lkm. | kpl |
| Monikäyttöinen | Käyttötapojen lkm. | kpl |

Kuva 13 Spesifikaatioiden määrittäminen [5, 74.]

Benchmarkkaus (engl. benchmarking) on suunnittelun apuvälineenä käytettävä metodi, jota käytetään etenkin silloin kun markkinoilla on jo olemassa vastaavanlaisia tai verrattavissa olevia tuotteita. Sen avulla omaa tuotetta verrataan kilpailijan tai jopa usean kilpailijan tuotteisiin, ja arvioidaan oman tuotteen suorituskykyä niihin nähden. Lisäksi benchmarkkauksen avulla voidaan löytää hyödyllistä tietoa, mitä voidaan hyödyntää oman tuotteen suunnittelussa. Benchmarkkauksen avulla saadaan yleensä selvitettyä, mihin asiakastarpeisiin kannattaa kiinnittää erityistä huomiota tuotetta suunniteltaessa. [5, 74.]

Laatukaaviota (engl. Quality Function Deployment) käytetään apuna konseptisuunnittelussa. Sen avulla asiakastarpeiden muuttaminen mitattaviksi tarpeiksi onnistuu kohtuullisen helposti, ja samalla on myös mahdollista vertailla tuotetta kilpailijoiden tuotteisiin. Laatukaaviossa mitattavat tarpeet asetetaan tärkeysjärjestykseen, ja sen perusteella voidaan tehdä päätöksiä, mihin suuntaan suunnittelua lähdetään viemään. [5, 79, 81.]

Kun asiakastarpeita on selvitetty riittävästi, voidaan aloittaa tuotteen luonnosteluprosessi. Kerättyjen tietojen pohjalta on tarkoitus luoda malli tai malleja, jotka esittävät mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja tuotteen eri toiminnoille. Niiden avulla eri ratkaisuvaihtoehtojen arvioiminen helpottuu. Toimintorakenteen laatiminen luonnosteluprosessin aikana helpottaa eri osatoimintojen hahmottamista ja auttaa ratkaisuvaihtoehtojen kehittämisessä. [5, 101.]

Vaikka CAD-järjestelmien käyttöä nykyään suositaan, ei luonnostelu aina onnistu ilman konkreettista paperille hahmottelua. Tehtyjen luonnoksien ei tarvitse olla täydellisiä, sillä ne ovat harvoin lopullisia. Useasti tuotteen lopullinen toimintorakenne voi muodostua useiden eri luonnosten yhdistelmästä. [5, 101.]

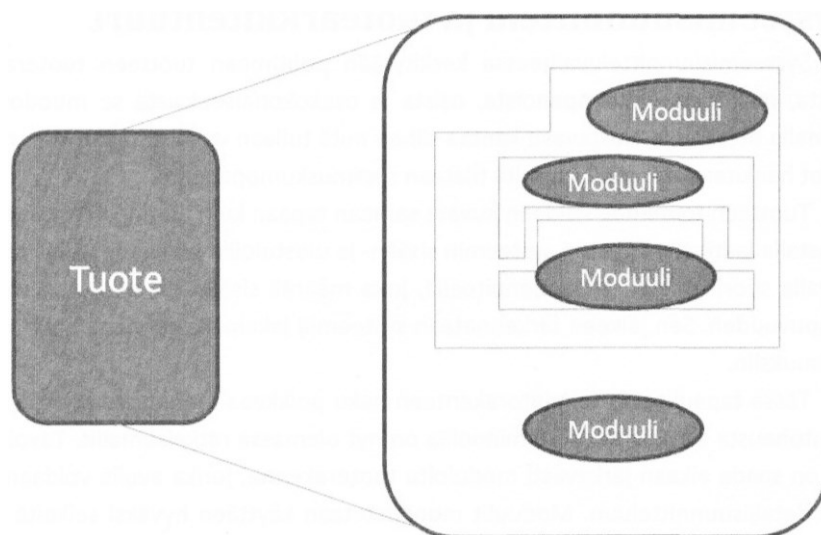
Erilaisia luonnoksia voi syntyä luonnosteluvaiheen aikana paljon ja niitä joudutaan usein karsimaan ennen jatkokehitykseen siirtymistä. Tällöin voidaan tukeutua eri analysointimenetelmiin. Luonnoksia voidaan peilata esimerkiksi asiakkaan asettamiin vaatimuksiin tai hyödyntää jotakin olemassa olevaa matemaattista mallia luonnosten vertailuun. Lisäksi luonnoksia voidaan arvioida esimerkiksi markkinatutkimuksien perusteella. [5, 109.]

4.3 Systemisuunnittelu

Systemisuunnittelua voidaan pitää eräänlaisena kehittälyvaiheena, jossa pääpaino on tuoterakenteen suunnittelussa. Tarkoituksena on selvittää minkälaisista osista, osakokonaisuuksista ja kokoonpanoista tuote tulee koostumaan. [5, 121.]

Systemisuunnitteluvaiheessa on tarkoitus laatia tuotteelle järkevästi moduloitu tuoterakenne, jonka kehittämistä on mahdollista jatkaa suunnittelun myöhemmissä vaiheissa. Luonnosteluvaiheessa luotua toimintorakennetta voidaan päivittää tarvittaessa, ja osakokoonpanoja kehitettäessä voidaan hyödyntää toimintorakenteen kaltaisia kaavioita suunnittelun apuna. Toimintorakenteen ollessa selvillä voidaan tuote jakaa moduuleihin, jotka toteuttavat tuotteen toimintoja. [5, 121.]

Tuotteen kehittäminen moduuleittain (kuva 14) tuo useita hyötyjä, sillä moduloinnin avulla tuotteiden massaräätälöinti helpottuu, ja tuotteita on mahdollista valmistaa yhä useamman asiakkaan tarpeisiin. Moduloinnin lisäksi suunnitteluvaiheessa on hyvä ottaa huomioon tuotteen valmistettavuuteen, käytettävyyteen ja turvallisuuteen liittyvät asiat. Valmistettavuuteen liittyen voidaan esimerkiksi määrittellä alustavasti, mitä osia valmistetaan itse ja mitkä hankitaan tavarantoimittajilta. [5, 122–123.]



Kuva 14 Tuotteen jako moduuleihin [5, 122.]

Tuotteen valmistettavuuteen liittyviä suunnittelumetodeja ovat DFA (Design for Assembly) ja DFMA (Design for Manufacturing and Assembly). Näitä menetelmiä hyödyntämällä tuotteen valmistus ja kokoonpano helpottuvat, kun kaikki oleellinen otetaan huomioon jo varhaisessa suunnittelun vaiheessa. [13, 255.]

Systeemisuunnitteluvaiheen tuloksena syntyy alustava suunnitelma tuotteen pääkokoonpanosta. Se voidaan esittää erilaisten kaavioiden, piirrosten tai 3D-mallien avulla. Systeemisuunnittelun vaihe on tärkeä koko suunnitteluprosessin kannalta, sillä se vaikuttaa merkittävästi tuotteen lopulliseen rakenteeseen. [5, 121.]

4.4 Detaljisuunnittelu

Detaljisuunnitteluvaihe pitää sisällään nimensä mukaisesti tuotteen rakenteiden yksityiskohtaista suunnittelua ja vahvistamista. Esimerkiksi lopulliset materiaali-valinnat, valmistusmenetelmät, tuotteen mitoitus ja toleranssit lyödään tässä vaiheessa lukkoon. [13, 15.]

Detaljisuunnitteluvaiheessa suoritetaan myös 3D-mallien viimeistely. Tarvittavat mitoitukset ja toleranssit päivitetään ajan tasalle, ja suoritetaan tarvittavat lujuustarkastelut. Tarvittaessa mitoituksia voidaan joutua muuttamaan niin, että ne täyttävät vaatimukset. Kun mallit on saatu viimeistelyä, voidaan suorittaa niiden dokumentaatio, joka pitää sisällään osa-, osakokoonpano- ja kokoonpanopiirustusten laatimista. [5, 131.]

Dokumentaatio voi tapahtua myös ilman varsinaisten piirustusten laadintaa, jos hyödynnetään malliin perustuvaa määrittelyä (MBD). Tällöin informaation hyödyntäminen helpottuu ja inhimillisten virheiden määrä vähenee. 3D-malliin määritettyjä tietoja voidaan hyödyntää suoraan esimerkiksi tuotannossa ja mittauksessa. [14.]

Detalji suunnitteluvaiheen tuloksena on aikaansaatu dokumentaatio tuotteen valmistuksen aloitusta varten sekä laadittu muita tuotteeseen liittyviä dokumentteja, kuten huolto-, kunnossapito- ja käyttöohjeita. [5, 148.]

4.5 Testaus ja parannus

Testaus ja parannusvaiheessa tuotteesta valmistetaan prototyyppi, jonka avulla voidaan arvioida tuotteen toimintaa sekä asetettujen tavoitteiden ja vaatimusten toteutumista. Tuotetta voidaan myös testata simuloinnin avulla tapauksissa, joissa prototyyppiä ei voida valmistaa. Esimerkiksi tuotteen suuri koko voi olla esteenä prototyypin valmistamiselle. [5, 195.]

Jos testausta halutaan suorittaa konkreettisella tasolla, voidaan tuotteesta valmistaa esimerkiksi vain kriittisimpiä komponentteja ja testata niiden toimintaa. Toinen vaihtoehto on valmistaa tuotteesta pienoismalli sopivassa mittakavassa. [5, 197.]

Havaittaessa ongelmia tai kehityksen kohteita, muutetaan rakenteita niin, että ne täyttävät vaatimukset. Kun tuote on testattu ja paranneltu valmiiksi, päivitetään vielä kaikki tarvittavat dokumentit ajan tasalle. Projekti katsotaan luovutetuksi, kun projektin tuloksena toteutettu tuote on saatu valmistukseen ilman ongelmia. [5, 56.]

4.6 Tuotannon käynnistäminen

Tuotekehitysprosessin päätteeksi voidaan siirtyä tuotannon käynnistämisvaiheeseen, jonka alussa tyypillisesti ajetaan niin sanottu nollasarja, jonka avulla nähdään, liittyykö tuotteen valmistamisprosessiin vielä jotakin ongelmia. Tarvittaessa valmistusprosessia muutetaan toimivampaan suuntaan. Kun valmistusprosessi on saatu sujuvaksi, laatuongelmia ei esiinny ja tuotteiden valmistaminen ei tuota ongelmia, voidaan suunnitteluprosessi lopettaa. [13, 16.]

5 Mittauslaitteiston suunnitteluprosessi

Karsintavoimien mittauslaitteiston suunnitteluprosessi aloitettiin heti opinnäytetyön toimeksiannon jälkeen. Suunnitteluprosessissa pyrittiin hyödyntämään työn kirjallisuusosiossa käsiteltyjä tuotekehityksen oppeja. Suunnittelun työvaiheet on esitetty alapuolella kronologisessa järjestyksessä.

5.1 Tehtävän selvittely

Karsintavoimien mittauslaitteiston suunnitteluprosessi päätettiin toteuttaa mukaillemalla edellä esiteltyä Ulrich & Eppinger -tuotekehitysmenetelmää ja VDI 2221 -standardin mukaista suunnitteluohjetta. Näistä menetelmistä valittiin tärkeimmät työvaiheet, joita myöhemmin sovellettiin karsintavoimien mittauslaitteiston suunnittelussa.

Suunniteltavaa mittauslaitteistoa ei ollut tarkoitus saattaa markkinoille, joten tuotekehitysprojektista jätettiin ulkopuolelle markkinointiin liittyvät työvaiheet. Samasta syystä myös tuotannon valmisteluun ja käynnistämiseen liittyvät työvaiheet jätettiin projektin ulkopuolelle.

Suunnitteluprosessi alkoi tehtävän selvittelyllä, jossa kartoitettiin mittauslaitteistolle haluttuja ominaisuuksia. Selvittelyvaiheessa toimeksiantajan kanssa tehtiin tiivistä yhteistyötä ja hahmoteltiin suunniteltavaa laitetta.

5.1.1 Alkusuunnittelukatsaus

Alkusuunnittelukatsauksen laatiminen aloitettiin heti suunnitteluprojektin käynnistyttyä ja sen sisältö koottiin pääasiassa Waratah OM Oy:n kanssa käytyjen sähköpostiviestien sekä Microsoft Teams -sovelluksen välityksellä käytyjen keskusteluiden perusteella.

Laadittu dokumentti haluttiin pitää mahdollisimman lyhyenä ja ytimekkäänä, joten sen pohjana hyödynnettiin Esa Hietikon ”Tuotekehitystoiminta” kirjassa esitettyä Ulrich & Eppinger -tuotekehitysmenetelmään perustuvaa asiakirjamallia.

Alkusuunnittelukatsauksessa mittauslaitteistolle laadittiin lyhyt kuvaus sen toiminnasta, projektille asetettiin kolme merkittävää tavoitetta ja mainittiin, että tuotetta ei suunnitella markkinoille, vaan Waratah OM Oy:n omaan tutkimuskäyttöön. Lisäksi suunnittelutyölle asetettiin muutamia reunaehtoja, joita työn toimeksiantaja oli halunnut, ja määritettiin suunniteltavan laitteiston sidosryhmät. Alkusuunnittelukatsaus on esitetty tämän opinnäytetyön liitteessä 1.

5.1.2 Vaatimusluettelo

Vaatimusluettelon (liite 2) aikaansaamiseksi kerättiin tarvittavia vaatimuksia ja toivomuksia niin paikan päällä kuin myös Teams -sovelluksen kautta käytyjen keskusteluiden pohjalta. Waratah OM Oy:n kanssa käytiin useita palavereja, joissa pyrittiin selvittämään yrityksen vaatimuksia ja toivomuksia suunniteltavaan mittauslaitteeseen liittyen.

Vaatimusluettelo laadittiin käyttäen apuna VDI 2221 -standardin mukaista asiakirjamallia. Vaatimuksia pyrittiin ryhmittelemään heti alusta alkaen, jotta niiden käsitteleminen olisi myöhemmässä vaiheessa helpompaa. Vaatimusluettelo päädyttiin jakamaan 12 osaan, joista itse laitteen toiminnan kannalta tärkeimmiksi valikoituivat voimantuotto sekä komponentit.

Lisäksi vaatimukset jaoteltiin toivomuksiin, vähimmäisvaatimuksiin ja kiinteisiin vaatimuksiin. Näiden perusteella pystyttiin myöhemmässä vaiheessa määrittämään, mitkä tekijät ovat olennaisia laitteen lopullisen toimintorakenteen kannalta.

Suunnitteluprosessin aikana vaatimusluetteloä esiteltiin Waratah OM Oy:lle ja sitä muokattiin ja täydennettiin keskustelujen pohjalta asiakkaan haluamaan suuntaan. Vaatimusluetteloä päivitettiin myös suunnitteluprosessin

myöhemmässä vaiheessa vastaamaan sen hetkistä mittauslaitteiston luonnosta. Päivitetty vaatimusluettelo on esitetty liitteessä 3.

5.2 Luonnosteluvaihe

Suunnitteluprosessin luonnosteluvaiheessa mittauslaitteiston vaatimuksia pyrittiin arvioimaan ja asettamaan ne tärkeysjärjestykseen. Lisäksi laitteiston toiminta jaettiin osatoimintoihin, joille luonnosteluvaiheen loppupuolella kehiteltiin erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja.

5.2.1 Tuotespesifikaatio

Tuotespesifikaatio laadittiin pääosin vaatimusluettelon pohjalta. Tarkoituksena tuotespesifikaatiossa oli muodostaa mahdollisimman monelle vaatimukselle sitä vastaava mitattava suure eli spesifikaatio.

Tämän opinnäytetyön tapauksessa jokaiselle vaatimukselle ei pystytty määrittämään mitattavaa suuretta, joten osa vaatimuksista jätettiin tuotespesifikaation ulkopuolelle. Alustava tuotespesifikaatio on esitetty liitteessä 4.

Tuotespesifikaation mallina hyödynnettiin Ulrich & Eppinger -tuotekehitysmenetelmän mukaista taulukkoa, johon spesifikaatiosuureet koottiin yksiköineen. Tavoitearvoja asetettiin suunnitteluprosessin alkuvaiheessa ainoastaan mittauslaitteiston käyttölämpötilalle, joksi valikoitui $\pm 40^{\circ}\text{C}$.

5.2.2 QFD – laatukaavio

Waratah OM Oy:n tarpeita pyrittiin kartoittamaan myös laatukaavion avulla (liite 5). Aiemmassa suunnitteluprosessin vaiheessa määritettyjä tuotespesifikaatioita hyödynnettiin laatukaaviota laadittaessa.

Laatukaaviota käyttämällä pyrittiin lyhentämään tuotteen kehitykseen kuluva aikaa ja tunnistamaan mittauslaitteiston toiminnan kannalta merkittäviä tekijöitä. Kilpailuanalyyysien tekeminen jätettiin kokonaan pois laatukaaviosta, sillä tuotetta ei ollut tarkoitus suunnitella markkinoille, vaan ainoastaan yrityksen omaan tutkimuskäyttöön.

Kaaviota täytettäessä asiakkaan vaatimukset asetettiin vasemmalle vaakariiveille ja niitä vastaavat spesifikaatiot ylhäälle pystysuuntaisiin sarakkeisiin. Tämän jälkeen vaatimuksien ja spesifikaatioiden vaikutuksia toisiinsa arvioitiin asteikolla heikko, maltillinen tai vahva. Jos vaatimuksien ja spesifikaatioiden välillä ei ollut mitään yhteyttä, jätettiin solu tyhjäksi.

Seuraavaksi laatukaaviossa määritettiin korrelaatiot teknisten ominaisuuksien välille. Tarkoituksena oli siis määrittää suureiden välille riippuvuudet, jos sellaisia löytyi. Samanaikaisesti teknisille ominaisuuksille määritettiin kehityksen suunta, jolla pyrittiin ilmaisemaan, halutaanko kyseisen suureen arvo minimoida vai maksimoida.

Kun kaikki tarvittava oli täytetty, muodostui teknisille ominaisuuksille kokonaispisteet, joiden perusteella pystyttiin arvioimaan ominaisuuksien paremmuutta. Viisi parasta ominaisuutta merkittiin vihreällä värillä laatukaavioon (kuva 15), ja tärkeimmiksi ominaisuuksiksi painottuivat mittalaitteiston voimantuottoon sekä voiman mittaamiseen liittyvät tekijät. Näitä teknisiä ominaisuuksia pyrittiin painottamaan suunnittelussa mahdollisimman paljon.

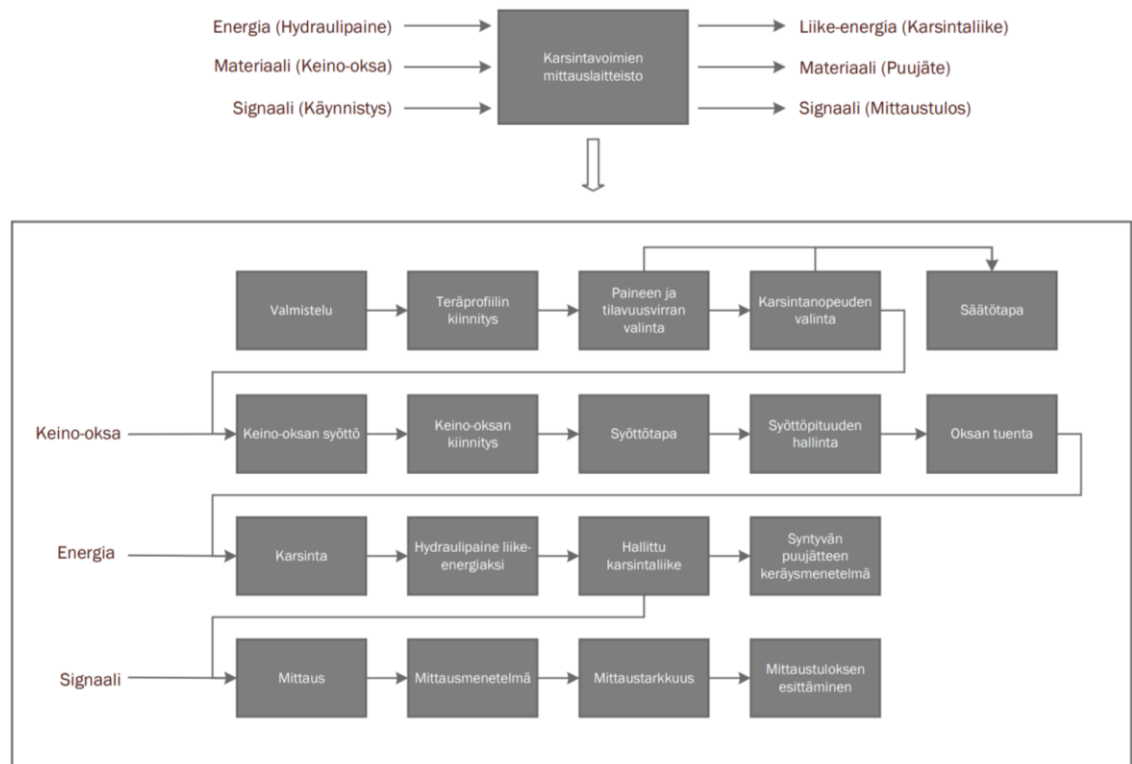
| Tavoite | Hydraulipaine (Mpa) | Tarvittava leikkausvoima (N) | Paine-ero (MPa) | Tilavuusvirta (m ³ /s) | Kohtisuora voima terään nähden (N) | Mittauksen toistettavuus (%) |
|------------------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Maksimi suhde | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Teknisten ominaisuuksien painoarvo | 480 | 480 | 395 | 434 | 504 | 460 |

Kuva 15 Laatukaavion perusteella saadut tulokset

5.2.3 Osatoimintoihin jako ja toimintorakenteen muodostaminen

Osatoimintoihin jako aloitettiin luonnostelemalla suunniteltavan mittauslaitteiston toimintorakennetta käyttäen apuna käsittekarttoja. Tällä tavoin pyrittiin hahmottelemaan laitteiston rakennetta mahdollisimman monesta eri näkökulmasta. Esimerkkejä osatoimintojen ideoinnista on esitetty opinnäytetyön liitteessä 6.

Kun toimintorakennetta oli luonnosteltu käsittekarttojen avulla riittävästi, koottiin niistä suunnittelun kannalta oleelliset asiat yhteen ja laadittiin tuotteelle alustava toimintorakenne. Toimintorakenne on esitetty alla olevassa kuvassa 16, jossa mittauslaitteiston toiminnot ovat aikajärjestyksessä.



Kuva 16 Mittauslaitteiston toimintorakenne

Toimintorakenteessa laitteen toiminta jaoteltiin neljään eri osatoimintoon: Valmistelu, keino-oksan syöttö, karsinta ja mittaus. Näiden osatoimintojen lisäksi toimintorakennetta täydennettiin osatoimintojen alaisilla toiminnoilla ja pohdittiin niiden suhteita toisiinsa.

5.2.4 Osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot ja niiden valinta

Kun mittauslaitteiston toimintorakenne oli saatu selville, voitiin eri osatoiminnoille alkaa kehittämään ja etsimään ratkaisuvaihtoehtoja. Tässä suunnittelu-prosessin vaiheessa hyödynnettiin erilaisia ideointimenetelmiä, ja niiden avulla pyrittiin löytämään mahdollisimman monia ratkaisuvaihtoehtoja osatoiminnoille. Lisäksi ratkaisuehdotuksia saatiin hankittua Waratah OM Oy:n kanssa käytyjen palaverien kautta.

Ideointimenetelmien avulla kehitetyt ratkaisuvaihtoehdot koottiin yhteen ja niistä merkittävimmät kerättiin taulukkoon. Kehitetyt ratkaisuehdotukset on esitetty tämän opinnäytetyön liitteessä 7.

Ennen siirtymistä kehittelyvaiheeseen, muodostettiin mittauslaitteistolle kolme luonnosehdotusta, joiden pohjalta laitetta lähdettiin kehittämään (kuva 17). Näiden kolmen luonnosehdotuksen luomisessa käytettiin apuna Excel-tilukkoa, jossa eri osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot oli pisteytetty asteikolla 1–5, jossa 5 pistettä annettiin parhaimmalle ratkaisuvaihtoehdolle ja 1 huonoimmalle.

Ratkaisuvaihtoehtoja arvioitiin suhteessa vaatimusluetteloon, laatukaavioon ja koneturvallisuuden toteutumiseen. Lisäksi ratkaisuvaihtoehdot pisteytettiin samaan taulukkoon myös Waratah OM Oy:n toimesta, ja pisteytykselle annettiin kaksinkertainen painoarvo. Ratkaisumuunnelmien pisteytystaulukko on esitetty opinnäytetyön liitteessä 8.

| | Osatoiminto | Ratkaisuvaihtoehdot | | | |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Valmistelu | Teräprofiilin kiinnitys | Pulttiliitos | Sokka | Ura/tappiliitos | Kitkakartioliitos |
| | Paineen valinta | Manuaalinen | Automaattinen | Manuaalinen ja automaattinen | - |
| | Karsintanopeuden valinta | Manuaalinen | Automaattinen | Manuaalinen ja automaattinen | - |
| Keino-oksen syöttö | Keino-oksen kiinnitys | Urassa | Rullien päällä | Hihnan päällä | Kiinnikkeiden päällä |
| | Oksan syöttötapa | Rullat | Sylinteri | Hihna | Käsin |
| | Syöttöpituuden hallinta | Mittapyörä | Anturointi | Mekaaninen haitta | Käsimenetelmin mittaamalla |
| | Oksan tuenta | Kiinteä ura | Rulla | Sylinteri | Mekaaninen lukitus |
| Karsinta | Hydraulipaine liike-energiaksi | Hydraulisyylinteri | Hydraulimoottori | Paineilma | - |
| | Hallittu karsintaliike | Kuulajohteet | Rullajohteet | Teleskooppikiskot | Laakerointi |
| | Karsintakulman säätö | Terän kääntö | Syöttökulman säätö sylinterillä | Syöttökulman säätö käsin | - |
| | Terän kulmansäätö mahdollisuudet | 1 kpl | 2 kpl | 3 kpl | Enemmän kuin 3kpl |
| | Syntyvän puujätteen keräysmenetelmä | Tyhjennettävä säiliö | Imuri | Kerääminen maasta | Ei keräystä |
| Mittaus | Mittausmenetelmä | Hydrauliikan paine-ero (Meno/tulo) | Venymäliuska- mittaus | Voima-anturi | - |
| | Mittaustarkkuus | 1 N | 10 N | 100 N | 1000 N |
| | Mittaustuloksen esittäminen | Analoginen | Digitaalinen | Digitaalinen ja analoginen | - |

V1= ■ V2= ■ V3= ■

Kuva 17 Mittauslaitteistolle luodut ratkaisuvaihtoehdot

Yllä olevassa kuvassa on esitetty kolme kehitettyä ratkaisuvaihtoehtoa mittauslaitteistolle. Sinisellä merkityssä ratkaisuvaihtoehdossa osatoiminnot valittiin eniten pisteitä saaneista osatoiminnoista, ja kaksi muuta vaihtoehtoa yhdisteltiin seuraavaksi parhaista osatoiminnoista.

5.3 Kehittelyvaihe

Kehittelyvaiheessa siirryttiin mittauslaitteiston varsinaiseen suunnitteluvaiheeseen, jonka aikana eri toiminnoille kehitettiin lopulliset ratkaisut ja ne konkretisoitiin 3D-mallien muodossa. Tarvittavat liitokset ja lujuustarkastelut tehtiin myös tässä vaiheessa.

5.3.1 Koneturvallisuus

Valtioneuvoston asetuksessa koneiden turvallisuudesta (12.6.2008/400) säädetään koneiden suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvistä olennaisista terveys- ja turvallisuusvaatimuksista. Lisäksi asetus käsittelee koneiden vaatimuksenmukaisuuden osoittamista, markkinoille saattamista sekä käyttöönottamista. [15.]

Asetuksen ensimmäisen luvun 3 §:ssä käsitellään lain soveltamisalaa rajaavia tapauksia. Tämän pykälän kahdeksannessa momentissa tilapäiseen laboratoriokäyttöön tulevien koneiden eli esimerkiksi jotakin tutkimusta varten suunniteltavan koneen todetaan jäävän lain soveltamisalan ulkopuolelle. [15.]

Waratah OM Oy:lle suunniteltavan laitteen todettiin jo aiemmin tulevan ainoastaan yrityksen omaan käyttöön, ja kyseessä oli tutkimustarkoitukseen suunniteltava laite. Täten voitiin todeta karsintavoimien mittauslaitteiston olevan juuri edellä mainitun momentin 8 mukainen, jolloin Valtioneuvoston asetusta ei tarvinnut soveltaa tämän koneen suunnittelussa.

Vaikka Koneasetuksen (12.6.2008/400) soveltamista ei tässä tapauksessa edellytettykään, oli koneen turvallisuuteen kiinnitettävä huomiota suunnitteluvaiheessa. Esimerkiksi mahdollinen puristumisvaara oli estettävä mittauslaitteiston valmistelun ja mittaustapahtuman aikana.

5.3.2 Käyttöympäristö

Suunniteltava mittauslaitteisto oli tarkoitus sijoittaa Waratah OM Oy:n tontilla sijaitsevaan testaustilaan (kuva 18), jonka sisämitat olivat 230x85x225 cm. Suunniteltavan mittauslaitteiston ulkomitat oli siis rajattava niin, että laitteisto olisi mahdollista asentaa testaustilaan. Lisäksi jo vaatimusluettelossa määritettiin, että laite oli pystyttävä kiinnittämään tilassa olevaan teräslevyyn pulttiliitoksilla.



Kuva 18 Waratah OM Oy:n testitila (Kuva: Ville Heinonen)

Alun perin mittauslaitteisto oli tarkoitus sijoittaa vieressä olevaan isompaan tilaan, mutta tilan säästämisen vuoksi päädyttiin hyödyntää yllä olevassa kuvassa esitettyä pienempää tilaa. Koneturvallisuuden kannalta suunniteltavan laitteen sijoittaminen kyseiseen tilaan oli järkevä ratkaisu, sillä sen oviin oli asetettu rajakytkimet, ja ovien avautuessa hydraulikoneikon toiminta pysähtyi.

Karsintatapahtuman aikana mittauslaitteiston tarkastelu onnistui kyseisessä tilassa pleksillä suojatun luukun läpi. Lisäksi testaustilan hydraulikkaa oli mahdollista käyttää etäyhteyden kautta viereisestä tilasta (kuva 19), ja hydraulikalle oli mahdollista luoda ajoitettuja mittausohjelmia.

Varsinaista hydraulikkasuunnittelua ei opinnäytetyössä tarvinnut tehdä, sillä testitilassa oli jo valmiina tarvittavat komponentit. Tarvittavien letkujen ja liittimien hankinta jätettiin opinnäytetyön toimeksiantajan vastuulle.



Kuva 19 Mittaushuone (Kuva: Ville Heinonen)

5.3.3 Karsintavoimaan vaikuttavat tekijät

Karsinnasta puhuttaessa tarkoitetaan puun oksien leikkaamista irti puun rungosta. Mekaanisessa metsäteollisuudessa karsinta tapahtuu harvesteripäiden avulla, joissa oksat karsitaan leikkaamalla ne karsintaterien avulla. Tavallisesti nykyaikaisissa harvesteripäissä on yksi kiinteä yläkarsintaterä ja neljä liikkuvaa terää. Puun syöttö tapahtuu rullien avulla, ja karsintanopeudet vaihtelevat tavallisesti 3–7 m/s. [16, 43–44.]

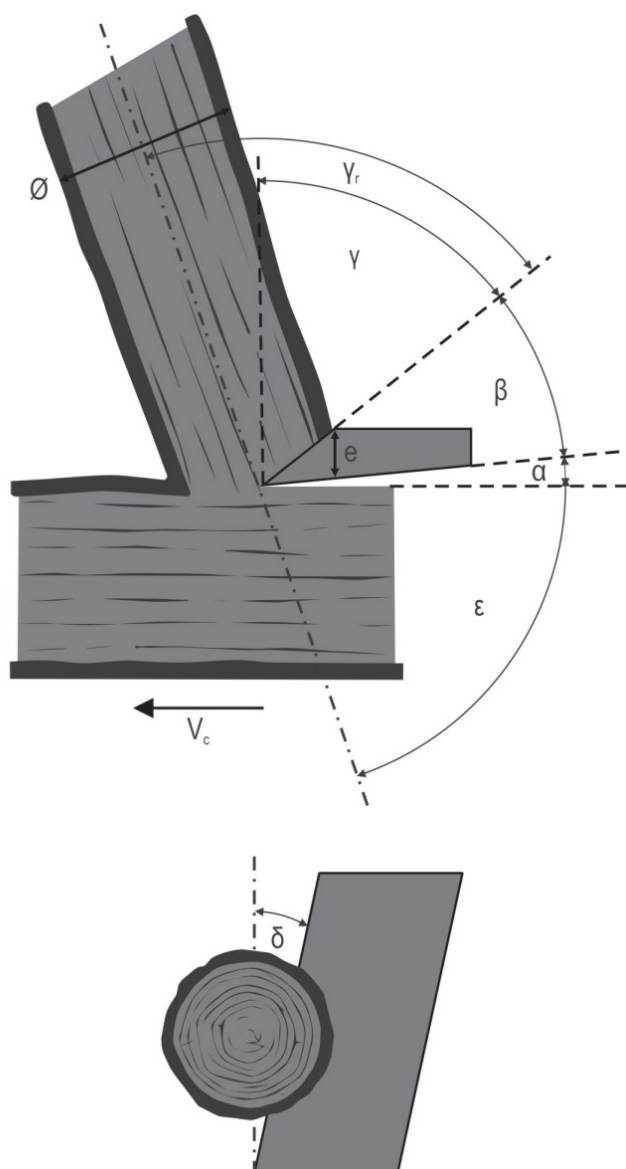
Mittauslaitteiston voimantuoton suunnittelua varten selvitettiin karsintavoimaan vaikuttavia tekijöitä karsintavoimiin liittyvien tutkimuksien pohjalta. Näiden tutkimusten tarkoituksena oli myös vahvistaa laskemalla saatuja tarvittavan karsintavoiman arvoja, sekä selvittää mitkä tekijät vaikuttavat karsintatapahtuman aikana vallitsevaan voimaan.

Karsintavoimiin ja niistä aiheutuviin muodonmuutoksiin liittyvää tutkimusta ei ollut tehty lähivuosina, joten opinnäytetyössä tukeuduttiin kahteen eri tutkimuslähteeseen. Lähdemateriaaleina käytettiin Waratah OM Oy:ltä saatua Mikko Paakunaisen diplomityötä sekä internetistä hankittua Kroatian metsätekniiikan lehden karsintavoimia ja muodonmuutoksia käsittelevää tutkimusraporttia.

Karsintavoimiin vaikuttavia tekijöitä on lukuisia ja niiden yhteisvaikutus määrittää kuinka suuri voima tarvitaan, jotta oksa saadaan katkaistua. Muuttujia ovat muun muassa terän suunnitteluvaiheessa määritettävät dimensiot ja kulmat, puun tekniset ominaisuudet sekä millä nopeudella ja missä kulmassa leikkaava terä lähestyy oksaa. [16, 45.]

Kuvassa 20 on esitetty Kroatian metsätekniiikan lehdessä julkaistussa tutkimuksessa esitettyjä karsintaan vaikuttavia suureita. Niitä tarkasteltaessa voidaan todeta niin terän kuin myös oksan geometrian vaikuttavan merkittävästi tarvittavaan voimantuottoon. Kuvassa esiintyvien suureiden merkitykset on esitetty alapuolella:

| | |
|---------------|---------------------------------|
| α | Rungon ja terän välinen kulma |
| β | Teräkulma |
| γ | Kaltevuuskulma |
| γ_r | Todellinen kaltevuuskulma |
| ε | Oksan kasvukulma runkoon nähden |
| e | Terän paksuus |
| δ | Vino leikkauskulma |
| V_c | Leikkausnopeus |
| \emptyset | Oksan halkaisija |



Kuva 20 Karsintavoimaan vaikuttavat suureet [16, 45.]

Tutkimuksessa karsintavoimia oli tarkasteltu kahden eri koejärjestelyn avulla, joista toisessa karsintavoimaa mitattiin heiluriliikkeen avulla. Tällä tavoin pyrittiin luomaan mahdollisimman realistinen mittaustapahtuma todelliseen karsintatapahtumaan nähden. Lisäksi karsintavoiman suuruutta oli tutkittu testipenkissä, jossa karsintanopeudet olivat pieniä. Terän asennon säätäminen oli tässä koejärjestelyssä mahdollista.

Näiden kahden eri koejärjestelyn avulla tehtyjen mittauksien tuloksina oli tutkimuksessa johdettu molemmille tapauksille yhtälöt, joita saadut mittaustulokset noudattivat. Tutkimuksessa johdetut yhtälöt on esitetty seuraavalla sivulla.

Heiluritestille johdettu tarvittavan karsintavoiman suuruus (kaava 1):

$$F_{max} = 520 \times A + 1367 \quad (1)$$

missä

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| F_{max} | Tarvittava karsintavoiman suuruus, N |
| A | Oksan poikkipinta-ala, cm^2 |

Hitaalle penkkitestille johdettu yhtälö (kaava 2):

$$F_{max} = 638 \times A + 581 \quad (2)$$

missä

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| F_{max} | Tarvittava karsintavoiman suuruus, N |
| A | Oksan poikkipinta-ala, cm^2 |

Vuonna 2002 tehdyssä Mikko Paakkunaisen diplomityössä oli myös tutkittu karsintavoimaan vaikuttavia tekijöitä, joista merkittävimpinä mainittiin karsinnan aikana vaikuttava pääkarsintavoima, terän puristusvoima sekä kitkavoima. Diplomityössä hyödynnetyt tutkimustulokset perustuivat ruotsalaisen Anders Uhmeierin tekemiin tutkimuksiin puun haketuksesta, joka on ilmiönä hyvin samankaltainen kuin karsintatapahtuma. [17, 47.]

Samassa diplomityössä oli Uhmeierin tutkimuksien lisäksi esitetty ruotsalaisen metsäalan tutkimuslaitoksen Skogforsk:n määrittelemät leikkausvoiman yhtälöt kuuselle ja männylle. Skogforsk:n mukaiset karsintavoiman arvot voidaan laskea kaavojen 3 ja 4 avulla.

Kuusen tarvittavan karsintavoiman suuruudelle on voimassa (kaava 3):

$$F_{kuusi} = 5D_b^2 + 100D_b \quad (3)$$

missä

| | |
|-------------|------------------------------------|
| F_{kuusi} | Tarvittava kuusen karsintavoima, N |
| D_b | Kuusen oksan halkaisija, mm |

Männyn tarvittavan karsintavoiman suuruudelle on voimassa (kaava 4):

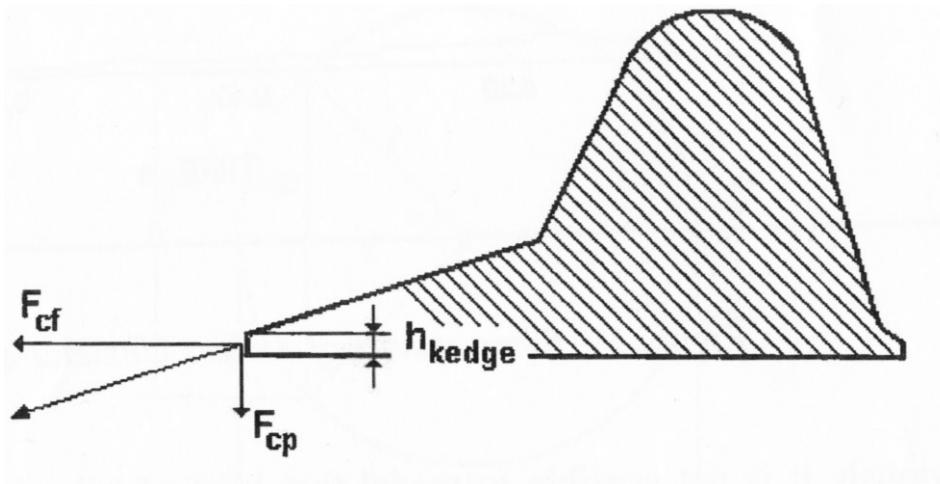
$$F_{m\ddot{a}nty} = 3D_b^2 + 75D_b \quad (4)$$

missä

| | |
|--------------------|------------------------------------|
| $F_{m\ddot{a}nty}$ | Tarvittava männyn karsintavoima, N |
| D_b | Männyn oksan halkaisija, mm |

Diplomityössä karsintavoimaan vaikuttavat tekijät oli esitetty karsintaterän profiilin poikkileikkauksen yhteydessä. Tämä tilanne on esitetty alapuolella kuvassa 21. Kuvassa esiintyvien suureiden merkitykset on selitetty alapuolelle:

| | |
|-------------|---|
| F_{cf} | Pääleikkausvoima |
| F_{cp} | Leikkauksen aikana vaikuttava teräpaine |
| h_{kedge} | Terän kärjen korkeus |



Kuva 21 Karsintavoiman komponentit [17, 47.]

5.3.4 Sylinterin mitoittaminen

Tarvittavan karsintavoiman laskemiseksi hyödynnettiin edellä mainittuja karsintavoiman kaavoja 1, 2, 3 ja 4. Näistä suurimman leikkausvoiman arvon tuotti kaava 3. Oksan halkaisijana karsintavoiman mitoituksessa käytettiin arvoa 100 mm. Tämä arvo oli määritetty opinnäytetyön toimeksiannossa.

Kaavan 3 mukaisesti tarvittavaksi karsintavoiman suuruudeksi saatiin:

$$F_{kuusi} = 5 \cdot 100^2 + 100 \cdot 100 = 60\,000 \text{ N}$$

Sylinteri päädyttiin mitoittamaan edellä lasketun suurimman karsintavoiman mukaan. Tällä tavoin pyrittiin varmistamaan, että mittauslaitteiston avulla olisi tarvittaessa mahdollista tutkia karsintatapahtumaa myös koivupuun oksien avulla. Koivun ollessa huomattavasti kuusta ja mäntyä kovempi puulaji, vaatii se myös suuremman leikkausvoiman katketakseen. Sylinteriä mitoitettaessa käytettiin varmuuskertoimen arvona 1,5. Tarvittava sylinterivoima saatiin laskettua kaavasta 5.

$$F_{työntö} = F_{kuusi} \cdot n \quad (5)$$

missä

$$F_{työntö} \quad \text{Tarvittava sylinterin työntövoima, N}$$

$$n \quad \text{Mitoituksen varmuuskerroin}$$

Tällöin sylinterin tarvittavaksi työntövoimaksi saatiin kaavan 5 mukaisesti:

$$F_{työntö} = 60\,000 \text{ N} \cdot 1,5 = 90\,000 \text{ N}$$

Kun tarvittava karsintavoiman arvo oli saatu selville, voitiin laskea tarvittava sylinterin männähalkaisijan koko. Männän mitoitusta varten tarvittiin Waratah OM Oy:n käytössä olevan hydraulikoneikon teknisiä tietoja, joten tarvittavat arvot selvitettiin toimeksiantajan edustajalta. Arvot on esitetty alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1 Hydraulikoneikon tiedot

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Sähkömoottorin teho P | 22 kW |
| Hydraulipumpun tuotto Q_p | 200 l/min |
| Järjestelmän maksimipaine P_{max} | 200 bar |

Sylinterin männänhalkaisija saatiin selvitettyä hyödyntämällä paineen ja ympyrän pinta-alan yhtälöitä (kaava 6 ja 7). Yhtälöt yhdistettiin (kaava 8) niin, että tuloksena saatiin tarvittava ympyrän halkaisija, eli tässä tapauksessa sylinterin männänhalkaisija.

Sylinterin paineelle on voimassa (kaava 6):

$$P_{suunnittelu} = \frac{F_{työntö}}{A_m \cdot \eta_s} \quad (6)$$

missä

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| $P_{suunnittelu}$ | Suunnittelupaine, N/mm ² |
| $F_{työntö}$ | Sylinterin työntövoima, N |
| A_m | Männän pinta-ala, mm ² |
| η_s | Sylinterin hyötysuhde |

Männänhalkaisija voidaan laskea alla olevan kaavan 7 mukaan:

$$D_m = \sqrt{\frac{4 \cdot A_m}{\pi}} \quad (7)$$

missä

| | |
|-------|-----------------------------------|
| D_m | Sylinterin männänhalkaisija, mm |
| A_m | Männän pinta-ala, mm ² |

Kaavat 6 ja 7 yhdistämällä saadaan laskettua tarvittava männänhalkaisija (kaava 8):

$$D_m = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{F_{karsinta}}{P_{max} \cdot \eta_s}}{\pi}} \quad (8)$$

Vaikka hydraulikoneikolla olisikin ollut mahdollista tuottaa suurempi paine sylinterille, käytettiin mitoituksessa suunnittelupaineen arvona 150 bar. Tällä tavoin pyrittiin varmistamaan, että tarvittu työntövoima pystyttäisiin tuottamaan

hydraulikoneikolla myös suurilla tilavuusvirran arvoilla. Lisäksi hydraulikomponenttien painekestävyyden kasvaessa, myös niiden hinnat nousevat. Valitsemalla hieman matalampi suunnittelupaine säästettiin myös kustannuksissa.

Sylinterin männänhalkaisija laskettiin kaavan 8 avulla, ja sylinterin hyötysuhteen arvona käytettiin 0,9. Tarvittava männänhalkaisijan suuruus on esitetty alla.

$$D_m = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{90\,000\,N}{15\,N/mm^2 \cdot 0,9}}{\pi}} \approx 92,1\,mm$$

Laskujen perusteella sylinterin männänhalkaisijan kooksi valikoitui 100 mm. Kyseiselle mäntäkoolle oli saatavilla kahta eri standardinmukaista männänvartta, joista valittiin halkaisijaltaan pienempi 56 mm. SFS-ISO 6020-1 -standardin mukaiset sylinterien koot on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 22).

| Sylinteri/Cylinder | | | | Kiertytetty männänvarren pää Threaded piston rod end | | |
|--------------------|-----|-----|-----|---|-----|-----|
| Halkaisija/Bore | VE | WF | ZJ | KK | MM | A |
| 25 | 15 | 28 | 150 | M12 × 1,25 | 14 | 16 |
| | | | | M14 × 1,5 | 18 | 18 |
| 32 | 19 | 32 | 170 | M14 × 1,5 | 18 | 18 |
| | | | | M16 × 1,5 | 22 | 22 |
| 40 | 19 | 32 | 190 | M16 × 1,5 | 22 | 22 |
| | | | | M20 × 1,5 | 28 | 28 |
| 50 | 24 | 38 | 205 | M20 × 1,5 | 28 | 28 |
| | | | | M27 × 2 | 36 | 36 |
| 63 | 29 | 45 | 224 | M27 × 2 | 36 | 36 |
| | | | | M33 × 2 | 45 | 45 |
| 80 | 36 | 54 | 250 | M33 × 2 | 45 | 45 |
| | | | | M42 × 2 | 56 | 56 |
| 100 | 37 | 57 | 300 | M42 × 2 | 56 | 56 |
| | | | | M48 × 2 | 70 | 63 |
| 125 | 37 | 60 | 325 | M48 × 2 | 70 | 63 |
| | | | | M64 × 3 | 90 | 85 |
| 160 | 41 | 66 | 370 | M64 × 3 | 90 | 85 |
| | | | | M80 × 3 | 110 | 95 |
| 200 | 45 | 75 | 450 | M80 × 3 | 110 | 95 |
| | | | | M100 × 3 | 140 | 112 |
| 250 | 64 | 96 | 550 | M100 × 3 | 140 | 112 |
| | | | | M125 × 4 | 180 | 125 |
| 320 | 71 | 108 | 660 | M125 × 4 | 180 | 125 |
| | | | | M160 × 4 | 220 | 160 |
| 400 | 90 | 130 | 740 | M160 × 4 | 220 | 160 |
| | | | | M200 × 4 | 280 | 200 |
| 500 | 110 | 163 | 890 | M200 × 4 | 280 | 200 |
| | | | | M250 × 6 | 360 | 250 |

Kuva 22 SFS-ISO 6020-1:n mukaiset sylinterin mitat [18, 4.]

Kun sylinterin männän sekä männänvarren halkaisijat oli saatu valittua, tehtiin sylinterille vielä nurjahdustarkastelu, jossa nurjahdusvoima laskettiin pahimassa kuormitustilanteessa eli sylinterin toisen pään ollessa täysin vapaana. Tälle nurjahdustapaukselle sovellettiin Euler 1. laskutapaa (kaava 9).

$$F_{nurjahdus} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_n^2} \quad (9)$$

missä

| | |
|-----------------|--|
| $F_{nurjahdus}$ | Männänvarren nurjahdukseen tarvittava voima, N |
| E | Teräksen kimmomoduuli, N/mm ² |
| I | Männänvarren jäyhyysmomentti, mm ⁴ |
| l_n | Männänvarren nurjahduspituus, mm |

Sylinterin männänvarren tarvittava nurjahdusvoima kaavan 9 mukaan.

$$F_{nurjahdus} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 482750 \text{ mm}^4}{(2 \cdot 250 \text{ mm})^2} = 4002,22 \text{ kN}$$

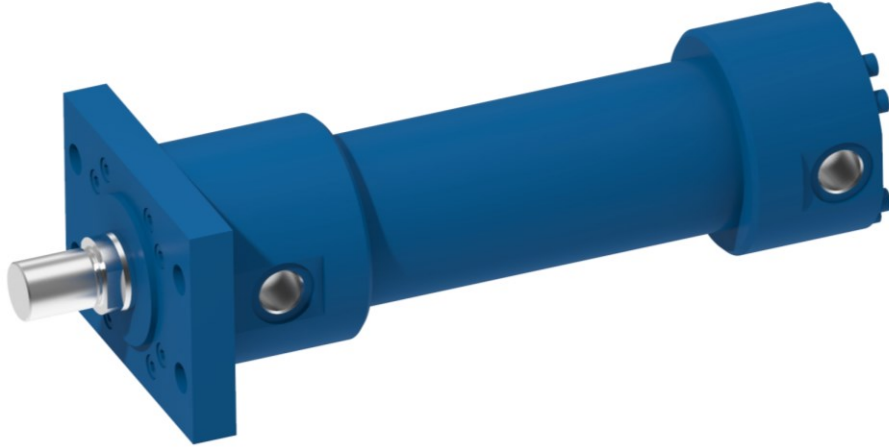
milloin

$$F_{työntö} < F_{nurjahdus}$$

Nurjahdusvoiman tulosta tarkasteltaessa, todettiin sen olevan monikymmenkertainen verrattuna sylinterillä tuotettavaan voimaan. Tällöin voitiin todeta männänvarren kestävän sylinterin työntövoiman nurjahtamatta.

Varsinaisen sylinterin mitoituksen jälkeen sylinteriin valittiin tarvittavat konfiguraatiot komponenttitoimittajan tarjoaman CAD-konfiguraattorin avulla. Kiinnitystapaksi päädyttiin valitsemaan suorakaiteen muotoinen MF1 laippakiinnike, jonka avulla sylinteri oli helppo kiinnittää laitteen runkoon. Lisäksi sylinteriin valittiin päätyvaimennukset ehkäisemään sylinterin vaurioitumista kovassa rasituksessa. Hydrauliletkujen liittimet valittiin Waratah OM Oy:n toiveen mukaisesti tuumaisella G1 kierteellä. Konfiguroidun sylinterin tarkemmat tiedot on esitetty liitteessä 9.

SFS-ISO 6020-1 -standardin mukainen sylinteri valikoitui tähän sovellukseen parhaimmaksi, johtuen 160 bar:n sallitusta maksimipaineesta. Mittauslaitteisto-
 on tuleva sylinteri valittiin Bosch Rexrothin tuotekatalogista. Valittu sylinteri on
 esitetty alla olevassa kuvassa 23.



Kuva 23 Sylinteri CDM1MF1

Lopuksi laskettiin sylinterillä saavutettavat nopeudet, sillä haluttiin varmistua siitä, että saavutetaan tarvittava karsintanopeus keino-oksen katkaisemiseksi. Sylinterin työntö- ja vetoliikkeen nopeudet on laskettu alla kaavojen 10 ja 11 mukaan.

Sylinterin työntöliikkeen nopeudelle on voimassa (kaava 10):

$$V_{\text{työntö}} = \frac{Q_p}{A_m} \quad (10)$$

missä

| | |
|---------------------|--|
| $V_{\text{työntö}}$ | Sylinterin työntöliikkeen nopeus, m/s |
| Q_p | Hydraulipumpun tuotto, m ³ /s |
| A_m | Männän pinta-ala, m ² |

Sylinterin vetoliikkeen nopeudelle on voimassa (kaava 11):

$$V_{\text{veto}} = \frac{Q_p}{A_m - A_{mv}} \quad (11)$$

missä

| | |
|------------|--|
| V_{veto} | Sylinterin vetoliikkeen nopeus, m/s |
| Q_p | Hydraulipumpun tuotto, m ³ /s |
| A_m | Männän pinta-ala, m ² |
| A_{mv} | Männänvarren pinta-ala, m ² |

Sylinterin työntöliikkeen nopeudeksi kaavan 10 mukaisesti saatiin:

$$V_{työntö} = \frac{200}{\frac{1000 \cdot 60}{0,007853} \text{ m}^3/\text{s}} = 0,424466 \text{ m/s}$$

Sylinterin vetoliikkeen nopeudeksi kaavan 11 mukaisesti saatiin:

$$V_{veto} = \frac{200}{\frac{1000 \cdot 60}{0,007853 \text{ m}^2 - 0,002463 \text{ m}^2} \text{ m}^3/\text{s}} = 0,618429 \text{ m/s}$$

Työntöliikkeen nopeutta arvioidessa todettiin sen riittävän kyseiseen sovellukseen, vaikka alkuperäisenä ajatuksena oli, että nopeuden arvo olisi ollut lähellä todellista karsintanopeutta. Vetoliikkeen nopeudella ei ollut tässä sovelluksessa käytännön merkitystä.

5.3.5 Rungon suunnittelu

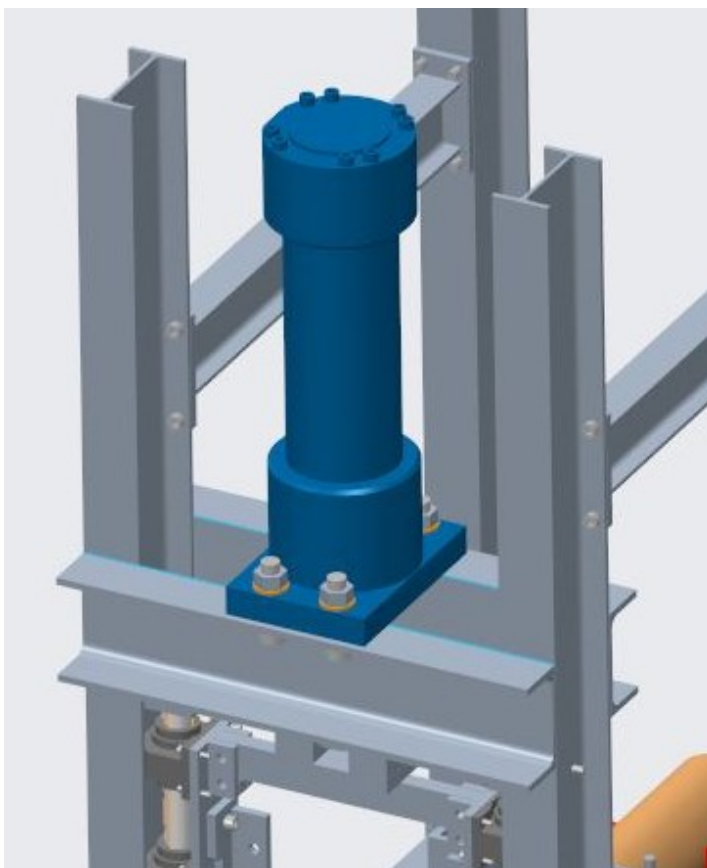
Varsinainen mallinnustyö aloitettiin heti sylinterin mitoittamisen jälkeen mittauslaitteen rungon suunnittelulla. Mallinnusohjelmanä opinnäytetyössä käytettiin PTC Creo Parametric 6.0:aa. Rungon suunnittelussa hyödynnettiin framework-työkalua, jonka avulla pystyttiin luomaan helposti erilaisia palkkirakenteita.

Rungon materiaalina päätettiin käyttää standardin mukaisia teräspalkkeja, joten mittauslaitteiston runko suunniteltiin hyödyntäen IPE ja UPE muotoisia teräspalkkeja. Käytettyjä palkkikokoja olivat IPE 160, UPE 120 ja UPE 80.

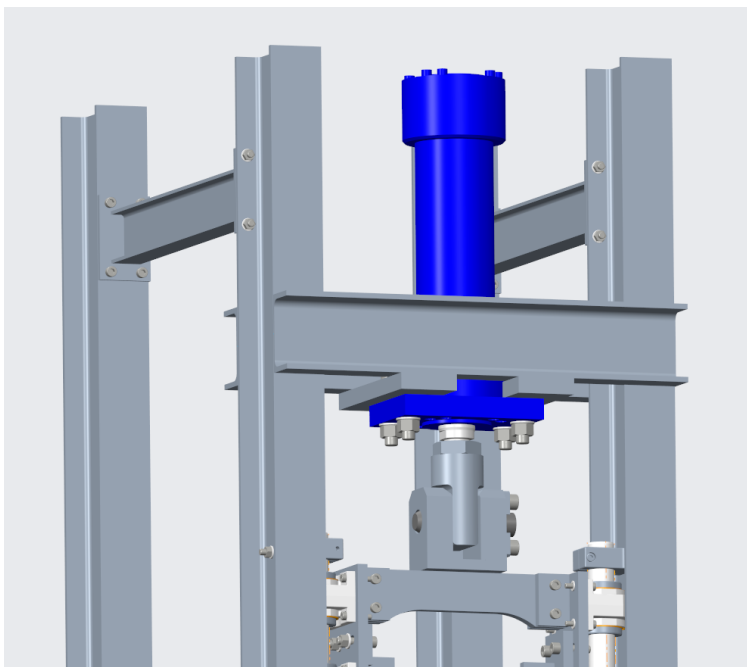
Liitostapoina rungossa käytettiin hitsaus- ja ruuviliitoksia. Ruuviliitoksiin käytettiin ISO-standardin mukaisia pultteja, aluslevyjä ja muttereita. Rungossa käytettyjen teräsrakenteiden materiaaliksi valittiin S355J2. Valintaperusteena käytettiin hyvää saatavuutta sekä riittävää lujuutta kyseiselle laitteistolle.

Sylinterin kiinnitys suunniteltiin niin, että kuormitus kohdistuisi mahdollisimman suurelle pinta-alalle, jolloin myös jännityksien ja siirtymien suuruudet saatiin pidettyä mahdollisimman pieninä. Alkuperäisen suunnitelman mukaisessa sylinterin kiinnityksessä voima välittyi suoraan kiinnityspulteille, jolloin niihin kohdistui hyvin suuri vetojännitys.

Suunnitteluprosessin lujuuslaskelmia tehdessä päätettiin kuitenkin vaihtaa sylinterin kiinnitystapaa, jotta rakenne saatiin varmasti kestäväksi. Suurimmaksi ongelmaksi alkuperäisessä kiinnityksessä muodostui pulteista aiheutuva pintapaine UPE-palkkien pinnalla. Alkuperäisen suunnitelman mukainen sylinterin kiinnitys on esitetty kuvassa 24 ja paranneltu versio kuvassa 25.



Kuva 24 Sylinterin alkuperäisen kiinnitys runkoon



Kuva 25 Paranneltu sylinterin kiinnitys

Kun sylinterin kiinnitys muutettiin UPE-palkkien alapinnalle, saatiin pintapaine jakaantumaan suuremmalle alalle, jolloin myös vallitsevat jännitykset pienenevät. Ongelmia päivitetystä kiinnitysratkaisusta tuotti sylinterin hydraulikkaliittimen sijainti, sillä se sijoittui hyvin lähelle sylinterin kiinnityslevyä. Tämän vuoksi toiseen kiinnityslevyyn päädyttiin koneistamaan pieni syvennys, jotta hydrauliliitin oli mahdollista asettaa paikalleen sylinteriin.

5.3.6 Karsintaterän ohjaus ja sen kiinnitykset

Mittauslaitteistossa käytettävän karsintaterän karsintaliike haluttiin pitää mahdollisimman tarkkana, joten karsintaterän kiinnityksen yhteyteen päädyttiin suunnittelemaan ohjurit. Niiden avulla varmistettiin lineaariliikkeen tasaisuus ja vältettiin terän pyrkiminen sivuille karsintatapahtuman aikana.

Lopullisessa ohjuren ratkaisussa päädyttiin käyttämään pyöreitä kuulaholkeja, joiden etuna oli helppo kiinnittäminen mittalaitteen runkoon. Ohjurien akselit, niiden kiinnikkeet ja kuulaholkit päätettiin hankkia valmiskomponentteina. Komponentit valittiin Bosch Rexrothin lineaaritekniikan tuotekatalogista.

Ohjausmekanismeissa käytetty kuulaholkki tyyppi on esitetty kuvassa 26 ja tuotedokumentaatio liitteessä 10.



Kuva 26 kuulaholkki R1065 [22.]

Alun perin mittauslaitteistossa oli tarkoitus käyttää karsintateränä kaarevaa teräprofiilia. Suunnitteluprosessin edetessä kaarevan profiilin käytöstä päätettiin kuitenkin luopua ja tilalle vaihdettiin suora teräprofiili. Tällä tavoin mittauslaitteen säätövaroja pystyttiin pienentämään huomattavasti. Säädettävänä kaarevan teräprofiilin käyttö olisi aiheuttanut helposti kohdistukseen liittyviä ongelmia, joihin terän muuttuvasta kaarevuussäteestä.

Mittauslaitteistossa käytettävän karsintaterän leveydeksi määritettiin 200 mm. Tämä leveys päädyttiin valitsemaan Waratah OM Oy:n kanssa käydyn keskustelun perusteella. Terän kiinnityksen suunnittelussa oli otettava myös huomioon korkeussuuntainen tila, jotta mittalaitteistossa olisi mahdollista käyttää kaikenkokoisia teräprofiileja. Korkeussuunnassa tilaa terälle jätettiin suurimman mahdollisen teräprofiilin mukaan eli vähintään 180 mm.

5.3.7 Hitsausliitokset

Mittauslaitteiston hitsausliitoksista mitoitettiin poikittaissuuntaisten sylinterin tukipalkkien liitokset, oksan karsintatuen kiinnittämistä varten tulevan alatuen liitokset sekä teräprofiilin liukumekanismeissa tarvittavat hitsausliitokset. Hitsausliitoksien mitoituksessa noudatettiin SFS-EN 1993-1-8 Eurocode 3:n mukaista yksinkertaistettua pienahitsin mitoitusohjetta. Menetelmässä hitsausseamaan

kohdistuvan voiman oletettiin olevan leikkausvoiman suuruinen eli pahin mahdollinen kuormitustilanne. Pienahitsin mitoituksen standardinmukaiset laskukaavat on esitetty alla.

Pienahitsin kestävyydelle on voimassa (kaava 12):

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (12)$$

missä

| | |
|------------|---|
| $F_{w,Ed}$ | Voiman mitoitusarvo hitsin pituusyksikköä kohti, N/mm |
| $F_{w,Rd}$ | Hitsin kestävyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti, N/mm |

Pienahitsin leikkauslujuuden mitoitusarvolle on voimassa (kaava 13):

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (13)$$

missä

| | |
|---------------|--|
| $f_{vw,d}$ | Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo, N |
| f_u | Perusaineen murtolujuus, N/mm ² |
| β_w | Pienahitsin korrelaatiokerroin |
| γ_{M2} | Hitsausliitoksen osavarmuusluku |

Hitsausliitoksen kestävyden mitoitusarvolle pituusyksikköä kohti (kaava 14):

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \cdot L \quad (14)$$

missä

| | |
|------------|---|
| $F_{w,Rd}$ | Hitsin kestävyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti, N/mm |
| $f_{vw,d}$ | Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo, N/mm ² |
| a | Hitsin a-mitta, mm |
| L | Hitsin pituus, mm |

Yksittäisen pienahitsin a-mitan laskemista varten kaavat 12, 13 ja 14 yhdistettiin. Yhdistetty kaava on esitetty alla (kaava 15).

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d} \cdot L} \quad (15)$$

Sylinterin tuottaman maksimivoiman oletettiin jakautuvan tasaisesti jokaiselle poikkipalkkien hitsisaumalle. Tällöin riitti, että laskettiin vain yhden pienahitsin kestävyys. Sylinterin työntövoiman jakaantuessa kahdeksalle hitsaussaumalle voiman mitoitusarvoksi saatiin:

$$F_{w,Ed} = \frac{125700 \text{ N}}{8} = 15712,5 \text{ N}$$

Tämän jälkeen laskettiin tarvittava a-mitta hitsille kaavan 15 mukaisesti.

$$a \geq \frac{15712,5 \text{ N}}{\frac{510 \text{ N/mm}^2}{0,9 \cdot 1,25 \cdot \sqrt{3}} \cdot 82 \text{ mm}} = 0,73 \text{ mm}$$

Tarvittavaa a-mittaa tarkasteltiin myös lämmöntonnin sekä hitsin pituuden ja a-mitan suhteen kannalta. Pienahitsin a-mitalle on lämmöntonnin kannalta voimassa (kaava 16):

$$a \geq \sqrt{t} - 0.5 \text{ mm} \quad (16)$$

missä

t Materiaalin vahvuus, mm

Lämmöntonnille tarvittavaksi a-mitaksi saatiin kaavan 16 mukaisesti:

$$a \geq \sqrt{7,8 \text{ mm}} - 0.5 \text{ mm} = 2,29$$

Pienahitsin pienin mahdollinen efektiivinen a-mitta SFS-EN 1993-1-8 -standardin mukaisesti on 3 mm. Lisäksi hitsin pituuden ja a-mitan suhteelle on voimassa (kaava 17):

$$6 \leq \frac{L}{a} \leq 150 \quad (17)$$

missä

| | |
|-----|------------------------|
| L | Hitsisauman pituus, mm |
| a | Hitsin a-mitta, mm |

Hitsausliitoksen todettiin kestävän standardinmukaisella minimi a-mitalla, jonka lisäksi hitsin pituuden ja a-mitan suhde oli kaavan 17 ehdon mukainen. Mittauslaitteiston valmistuksen kannalta lopulliseksi a-mitaksi valittiin kuitenkin 5 mm. Tällä päätöksellä pyrittiin helpottamaan hitsaajan työtä, sillä 3 mm:n minimi a-mitan hitsaaminen olisi ollut valmistuksen kannalta epäedullista. Lopuksi laskettiin, toteutuuko hitsin pituuden ja a-mitan suhteen ehto 5 mm:n a-mitalla. Tällöin hitsin pituuden ja a-mitan suhteeksi saatiin kaavan 17 mukaisesti.

$$6 \leq \frac{82 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} = 16,4 \leq 150$$

Ehto toteutui, joten 5 mm:n a-mitan todettiin olevan riittävä sylinterin tukipalkkien liitoksiin. 5 mm:n a-mitan käyttö toi myös lisää varmuutta liitoksien kestävyteen.

Karsintatuen alatukipalkin hitsausliitokset mitoitettiin samalla tavalla kuin sylinterin tukipalkit. Tarvittavaksi hitsausauman a-mitaksi alatukipalkille saatiin kaavan 15 mukaisesti:

$$a \geq \frac{31425 \text{ N}}{\frac{510 \text{ N/mm}^2}{0,9 \cdot 1,25 \cdot \sqrt{3}} \cdot 82 \text{ mm}} = 1,46 \text{ mm}$$

Myös tässä tapauksessa tarvittavan a-mitan suuruutta tarkasteltiin lämmöntuonin kannalta. Tällä tavoin voitiin varmistua siitä, että liitoksen lujuus on riittävä.

Lämmöntuonnin mukainen tarvittava a-mitta kaavan 16 mukaisesti:

$$a \geq \sqrt{5 \text{ mm}} - 0.5 \text{ mm} = 1,74 \text{ mm}$$

Jokainen mitoittamista vaativa hitsausseura laskettiin yläpuolella esitetyn yksinkertaisen mitoitusmenetelmän mukaisesti hyödyntämällä Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Mitoitettujen hitsausliitoksien vaaditut a-mitat on esitetty taulukossa 2 ja niiden laskenta liitteessä 11. Valmistuksellisista syistä kaikki hitsausliitokset päätettiin toteuttaa 5 mm:n a-mitalla, jonka kestävyys riitti kaikkiin mitoituksiin vaativiin liitoksiin.

Taulukko 2 Mitoituksen perusteella saadut a-mitan arvot

| Liitos | Tarvittava a-mitta/mm | Lämmöntuonnin mukainen a-mitta/mm |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Sylinterin tukipalkkien hitsausseurat | 0,73 | 2,29 |
| Alatukipalkin kiinnitys runkoon | 1,46 | 1,74 |
| Sylinterin kiinnityksen laipat | 1,50 | 3,50 |
| Karsintaterän kiinnityslaippa | 1,00 | 3,50 |
| Yhdistinpalkin kiinnityslaipat | 1,50 | 3,50 |
| Karsintatuen kiinnityspala | 2,40 | 2,15 |

5.3.8 Ruuviliitokset

Mittauslaitteiston ruuviliitokset mitoitetiin SFS-EN 1993-1-8 Eurocode 3:ssa esitettyjen mitoitusperiaatteiden mukaan. Ruuvien vapaareikien sijoittelussa noudatettiin myös standardin mukaista ohjetta. Ruuvien pääty- ja reunaetäisyydet asetettiin vähintään minimiarvon päähän levyosien reunoista. Standardin mukaiset ruuvireikien etäisyydet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Pienin ja suurin keskiöväli, pääty- ja reunaetäisyydet [19, 24.]

| Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli, ks. kuva 3.1 | Minimiarvo | Maksimiarvo ^{1) 2) 3)} | | |
|---|------------------------|---|--|---|
| | | EN 10025 mukaisista teräksistä (paitsi EN 10025-5:n mukaiset teräksiset) tehdyt rakenteet | | EN 10025-5 mukaisista teräksistä tehdyt rakenteet |
| | | Säälle tai muille korroosiorasituksille altis rakenne | Rakenne, joka ei ole altis säälle tai muille korroosiorasituksille | Suojaamaton rakenne |
| Päätyetäisyys e_1 | $1,2d_0$ | $4t + 40$ mm | | Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm |
| Reunaetäisyys e_2 | $1,2d_0$ | $4t + 40$ mm | | Suurempi arvoista $8t$ or 125 mm |
| Etäisyys e_3 Pidennetyissä rei'issä | $1,5d_0$ ⁴⁾ | | | |
| Etäisyys e_4 Pidennetyissä rei'issä | $1,5d_0$ ⁴⁾ | | | |
| Keskiöväli p_1 | $2,2d_0$ | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm | Pienempi arvoista $14t_{min}$ ja 175 mm |
| Keskiöväli $p_{1,0}$ | | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm | | |
| Keskiöväli $p_{1,t}$ | | Pienempi arvoista $28t$ ja 400 mm | | |
| Keskiöväli p_2 ⁵⁾ | $2,4d_0$ | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm | Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm | Pienempi arvoista $14t_{min}$ ja 175 mm |

1) Keskiöväleillä, pääty- ja reunaetäisyyksillä ei ole ylärajaa paitsi seuraavissa tapauksissa:
- puristetussa rakenneosissa paikallisen lommahduksen ja korroosion välttämiseksi korroosiorasituksen alaisena ja;
- korroosiorasitukselle alttiit vedetyt rakenneosat korroosion välttämiseksi.

2) Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallinen lommahdus lasketaan standardin EN 1993-1-1 mukaan olettamalla levy pilariksi ja käyttämällä nurjahduspituutena arvoa $0,6p_1$. Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallista lommahdusta ei tarvitse tarkistaa, jos p_1/t on pienempi kuin $9e$. Reunaetäisyys saa olla enintään ulokkeelliselle puristetulle taso-osalle esitetyn arvon suurin paikallisen lommahduksen estämiseksi, ks. standardi EN 1993-1-1. Tämä vaatimus ei koske päätyetäisyyttä.

3) t on uloimman liitettävän osan pienempi paksuus.

4) Pidennettyjen reikien raja-arvot esitetään kohdan 1.2.7 mukaisessa viitestandardiryhmässä 7.

5) Limitetyille kiinnitinriiveille voidaan käyttää minimiarvoa $p_2 = 1,2d_0$, jos kahden limityksessä olevan kiinnittimen välinen minimietäisyys $L \geq 2,4d_0$, ks. kuva 3.1b).

Eurocode 3:ssa on esitetty ruuvien eri kuormitustilanteille omat laskukaavat, joiden perusteella liitokset on mitoittettava. Mittauslaitteiston suunnittelussa käytetyt kuormitusta välittävät ruuviliitokset olivat kaikki leikkauskuormituksen alaisia. Standardissa esitetyt ruuvien mitoituksen kaavat leikkaavalle kuormitukselle on esitetty alapuolella. Ruuvien leikkauskestävyydelle on voimassa (kaava 18):

$$F_{v,rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A \cdot m}{\gamma_{M2}} \quad (18)$$

missä

$F_{v,rd}$ Ruuvien leikkauskestävyys, N

f_{ub} Ruuvien vetomurtolujuus, N/mm²

α_v Ruuvien kierteiden ollessa leikkaustasossa $\alpha_v=0,6$ lujuusluokille 4.6, 5.6 ja 8.8; $\alpha_v =0,5$ lujuusluokille 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9; kierteettömän osan ollessa leikkaustasossa $\alpha_v=0,6$

| | |
|---------------|--|
| A | Ruuvien jännityspinta-ala, mm ² |
| γ_{M2} | Ruuviliitoksen osavarmuusluku |

Leikkauskuormituksessa ruuvien kestävyydelle on oltava voimassa kaavan 19 mukainen ehto.

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (19)$$

missä

| | |
|------------|---------------------------------|
| $F_{v,Ed}$ | Ruuviliitoksen leikkausvoima, N |
| $F_{v,Rd}$ | Ruuvien leikkauskestävyys, N |

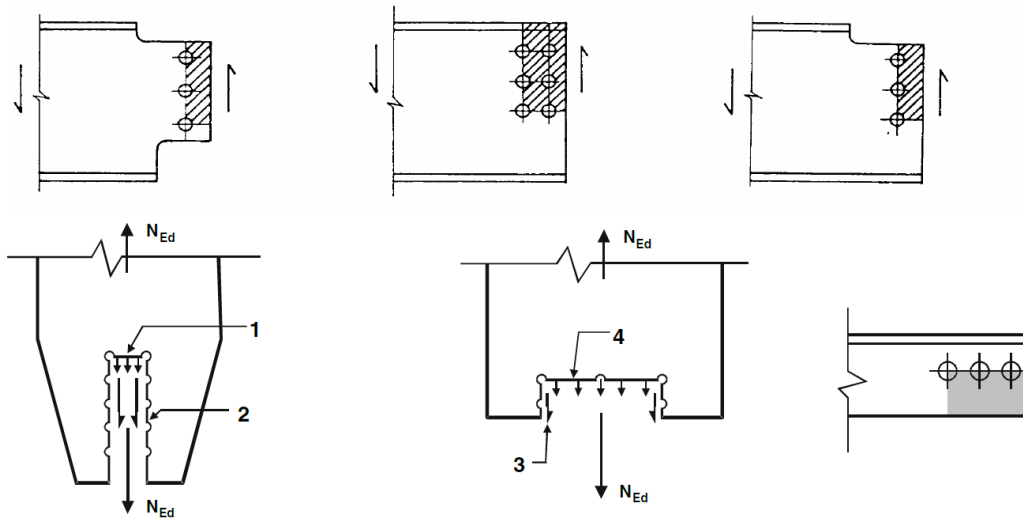
Teräslevyn reunapuristuskestävyydelle on voimassa (kaava 20):

$$F_{b,Rd} \leq \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (20)$$

missä

| | |
|---------------|---|
| $F_{b,Rd}$ | Ruuvien reunapuristuskestävyys, N/mm ² |
| k_1 | Reunarivin ruuveille pienin arvoista ($2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ ja 2,5); muille kuin pään ruuveille ($1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ ja 2,5) |
| α_b | Pienin arvoista ($\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1,0$) |
| f_u | Perusaineen murtolujuus, N/mm ² |
| d | Ruuvien halkaisija, mm |
| t | Teräslevyn ainevahvuus, mm |
| γ_{M2} | Ruuviliitoksen osavarmuusluku |

Ruuviliitokset on tarkistettava vielä lopuksi palamurtumisen varalta. Palamurtumisella tarkoitetaan perusaineen leikkausmurtumista leikkauksen rasittamassa leikkauspinnassa, johon liittyy perusaineen vetomurtuminen vedon rasittamalla pinnalla. Palamurtuminen tapahtuu aina ruuvien keskilinjoja pitkin. Palamurtumisen eri tyypit on esitetty kuvassa 25. [19, 35.]



Kuva 27 Palamurtumisen eri tyypit [19, 35.]

Palamurtumiselle on SFS-EN 1993-1-8 standardin mukaisesti voimassa (kaava 21):

$$V_{eff,1,Rd} = f_u \cdot \frac{A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (21)$$

missä

| | |
|----------------|---|
| $V_{eff,1,Rd}$ | Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo, N |
| f_u | Teräslevyn murtolujuus, N/mm ² |
| f_y | Teräslevyn myötöraja, N/mm ² |
| A_{nt} | Vedon rasittama nettopinta-ala, mm ² |
| A_{nv} | Leikkauksen rasittama nettopinta-ala, mm ² |
| γ_{M0} | Yleisesti 1,0; ruostumattomille 1,1 |
| γ_{M2} | Ruuviliitoksen osavarmuusluku |

Ruuviliitoksien mitoittamista varten oli laskettava ruuveihin kohdistuva leikkausvoima. Poikittaistangon ruuviliitoksessa sylinterin työntövoiman oletettiin jakautuvan tasaisesti neljälle ruuville. Yhteen ruuviin kohdistuva leikkausvoima saatiin laskettua kaavasta 22.

$$F_{v,Ed} = \frac{F_{työntö}^{max}/2}{2} \quad (22)$$

missä

$F_{v,Ed}$ Ruuviliitoksen leikkausvoima, N

$F_{työntö}^{max}$ Sylinterin maksimi työntövoima, N

Yhden ruuviliitoksen leikkausvoimaksi poikittaistangossa saatiin kaavan 22 mukaisesti:

$$F_{v,Ed} = \frac{125700 \text{ N}/2}{2} = 31425 \text{ N}$$

Kaavan 19 mukaisen ehdon mukaisesti on siis oltava voimassa:

$$F_{v,Rd} \geq 31425 \text{ N}$$

Kun tarvittava leikkauskestävyys yhdelle ruuville oli määritetty, voitiin laskea tarvittava ruuvikoko ratkaisemalla ruuvin jännityspinta-ala kaavasta 18. Liitoksissa päätettiin käyttää lujuusluokan 8.8 ruuveja. Ruuvien murtolujuus saatiin taulukosta 4.

Taulukko 4 Ruuvien myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot [19, 21.]

| Ruuvien lujuusluokka | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 10.9 |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| f_{yb} (N/mm ²) | 240 | 320 | 300 | 400 | 480 | 640 | 900 |
| f_{ub} (N/mm ²) | 400 | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 | 1000 |

Poikittaistangon yhden ruuvin tarvittavaksi jännityspinta-alaksi saatiin kaavan 18 mukaisesti:

$$A = \frac{31425 \text{ N} \cdot 1,25}{0,6 \cdot 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 2} = 40,91 \text{ mm}^2$$

Tarvittava pulttikoko saatiin valittua etsimällä metrinen ISO vakiokierteisten ruuvien tiedoista (taulukko 5) jännityspoikkipinta-alaltaan vähintään lasketun arvon suuruinen ruuvi. Leikkausvoiman perusteella tehdyn mitoituksen perusteella poikittaistangon ruuvikooksi valikoitui M10.

Taulukko 5 Ruuvien tietoja Metrinen ISO vakiokierre [20, 26.]

| Kierre ^{a)} <i>d</i> | Nimellinen jännityspoikkipinta-ala <i>A_{s,nom}</i> ^{b)} mm ² | Lujuusluokka | | | | | | | | |
|----------------------------------|---|--|---------|----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|----------------------|---------------|
| | | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 9.8 | 10.9 | 12.9/ 12.9 |
| | | Vähimmäisvetokuorma <i>F_{m,min}</i> (<i>A_{s,nom}</i> × <i>R_{m,min}</i>), N | | | | | | | | |
| M3 | 5,03 | 2 010 | 2 110 | 2 510 | 2 620 | 3 020 | 4 020 | 4 530 | 5 230 | 6 140 |
| M3,5 | 6,78 | 2 710 | 2 850 | 3 390 | 3 530 | 4 070 | 5 420 | 6 100 | 7 050 | 8 270 |
| M4 | 8,78 | 3 510 | 3 690 | 4 390 | 4 570 | 5 270 | 7 020 | 7 900 | 9 130 | 10 700 |
| M5 | 14,2 | 5 680 | 5 960 | 7 100 | 7 380 | 8 520 | 11 350 | 12 800 | 14 800 | 17 300 |
| M6 | 20,1 | 8 040 | 8 440 | 10 000 | 10 400 | 12 100 | 16 100 | 18 100 | 20 900 | 24 500 |
| M7 | 28,9 | 11 600 | 12 100 | 14 400 | 15 000 | 17 300 | 23 100 | 26 000 | 30 100 | 35 300 |
| M8 | 36,6 | 14 600 ^{c)} | 15 400 | 18 300 ^{c)} | 19 000 | 22 000 | 29 200 ^{c)} | 32 900 | 38 100 ^{c)} | 44 600 |
| M10 | 58 | 23 200 ^{c)} | 24 400 | 29 000 ^{c)} | 30 200 | 34 800 | 46 400 ^{c)} | 52 200 | 60 300 ^{c)} | 70 800 |
| M12 | 84,3 | 33 700 | 35 400 | 42 200 | 43 800 | 50 600 | 67 400 ^{d)} | 75 900 | 87 700 | 103 000 |
| M14 | 115 | 46 000 | 48 300 | 57 500 | 59 800 | 69 000 | 92 000 ^{d)} | 104 000 | 120 000 | 140 000 |
| M16 | 157 | 62 800 | 65 900 | 78 500 | 81 600 | 94 000 | 125 000 ^{d)} | 141 000 | 163 000 | 192 000 |
| M18 | 192 | 76 800 | 80 600 | 96 000 | 99 800 | 115 000 | 159 000 | – | 200 000 | 234 000 |
| M20 | 245 | 98 000 | 103 000 | 122 000 | 127 000 | 147 000 | 203 000 | – | 255 000 | 299 000 |
| M22 | 303 | 121 000 | 127 000 | 152 000 | 158 000 | 182 000 | 252 000 | – | 315 000 | 370 000 |
| M24 | 353 | 141 000 | 148 000 | 176 000 | 184 000 | 212 000 | 293 000 | – | 367 000 | 431 000 |
| M27 | 459 | 184 000 | 193 000 | 230 000 | 239 000 | 275 000 | 381 000 | – | 477 000 | 560 000 |
| M30 | 561 | 224 000 | 236 000 | 280 000 | 292 000 | 337 000 | 466 000 | – | 583 000 | 684 000 |
| M33 | 694 | 278 000 | 292 000 | 347 000 | 361 000 | 416 000 | 576 000 | – | 722 000 | 847 000 |
| M36 | 817 | 327 000 | 343 000 | 408 000 | 425 000 | 490 000 | 678 000 | – | 850 000 | 997 000 |
| M39 | 976 | 390 000 | 410 000 | 488 000 | 508 000 | 586 000 | 810 000 | – | 1 020 000 | 1 200 000 |

Ruuvikoon määrittämisen jälkeen oli tarkistettava reunapuristuskestävyys, jonka arvo saatiin laskettua kaavasta 20. Reunapuristuskestävyydeksi poikittaistangossa saatiin:

$$F_{b,Rd} \leq \frac{2,4481 \cdot 0,4444 \cdot 510 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 10 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}}{1,25} = 44,39 \text{ kN}$$

Laskettua reunapuristuskestävyyden arvoa oli verrattava sallittuun kuormitukseen. Eurocode 3:n mukaan reunapuristuskestävyydelle oli oltava voimassa kaavan 23 mukainen ehto.

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd} \quad (23)$$

Lasketun reunapuristuskestävyyden todettiin olevan yllä esitetyn ehdon mukainen, joten voitiin todeta liitoksen kestävä rasituksen. Viimeisenä poikittaistangon ruuviliitosta tarkasteltiin palamurtumisen kannalta. Liitoksen palamurtumiskestävyys saatiin laskettua kaavan 21 avulla ja sen kestävyudeksi saatiin:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{510 \text{ N/mm}^2 \cdot 25 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} \cdot 2}{1,25} + \frac{355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 62 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} \cdot 2}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 916,30 \text{ kN}$$

Poikittaistangon palamurtumiskestävyden todettiin olevan huomattavasti suurempi kuin liitoksessa vaikuttava voima, jolloin voitiin todeta, ettei palamurtumista liitoksessa tapahdu. Kun leikkaus-, reunapuristus- ja palamurtumiskestävydet oli tarkistettu, voitiin todeta liitoksen kestävä siihen kohdistuvan kuormituksen.

Kaikki mittauslaitteiston mitoitusta vaativat liitokset mitoitettiin yllä esitetyllä Eurocode 3:n mukaisella mitoitustavalla. Jokainen liitos tarkistettiin leikkaantuvuuden, reunapuristuksen ja palamurtumisen varalta. Laskettujen ruuviliitoksien tulokset on esitetty taulukossa 6 ja niiden laskenta liitteessä 12.

Taulukko 6 Mitoitetut ruuviliitokset

| Liitos | Pulttikoko | Reunapuristuskestävyys/kN | Palamurtumiskestävyys/kN |
|--------------------------------|------------|---------------------------|--------------------------|
| Poikittaistangon ruuviliitos | M10 | 44,39 | 916,30 |
| Terän liukuosan ruuviliitos | M12 | 74,18 | 425,09 |
| Terän kiinnityksen ruuviliitos | M12 | 86,03 | 396,25 |
| Karsintatuen ruuviliitos | M12 | 47,24 | 153,24 |

5.3.9 Karsintavoiman mittaus

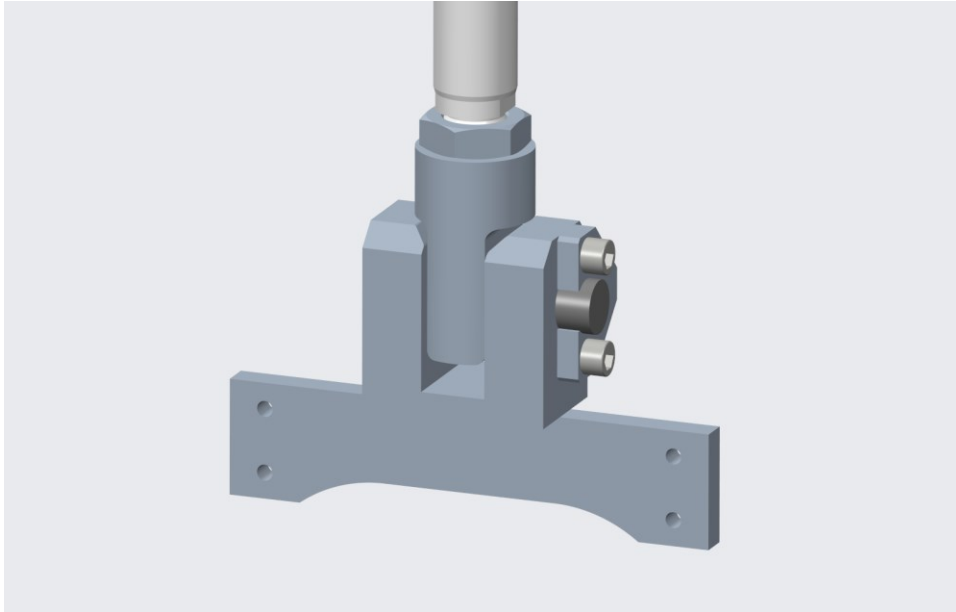
Karsintavoiman mittaus päätettiin toteuttaa mittaamalla leikkausvoimaa voima-anturin avulla sylinterin ja karsintaterän kiinnityksen liitoksesta. Lisäksi karsintavoimaa oli mahdollista tarkastella hydraulipaineesta meno- ja tulopuolen paineeron avulla. Tämän toteuttamiseen päätettiin hyödyntää Waratah OM Oy:n testitilassa käytössä olevaa mittauslaitteistoa.

Karsintavoimaa mittaamaan valittiin Bosch Rexrothin KMB 090 voima-anturi (kuva 28). Anturin valinnan perusteina olivat sen helppo asentamistapa, sovellukseen sopiva käyttölämpötila-alue (-35°C – $+85^{\circ}\text{C}$) sekä se, että anturin mittausalue $\pm 90\text{ kN}$ oli riittävä mittauslaitteistoon. Voima-anturin tuotedokumentti on esitetty opinnäytetyön liitteessä 13.



Kuva 28 Bosch Rexroth KMB voima-anturi [21.]

Voima-anturin kiinnitys sylinteriin toteutettiin koneistettavan holkin avulla, jonka asento oli säädettävissä mutterin avulla kohdalleen. Kokoonpanossa holkki oli tarkoitus yhdistää poikittaistankoon hitsattuihin sivutukiin työntämällä voima-anturi koneistettujen reikien läpi. Reikien toleranssit määritettiin voima-anturin valmistajan ohjeen mukaisesti. Suunniteltu voima-anturin kiinnityksen kokoonpano on esitetty kuvassa 29.



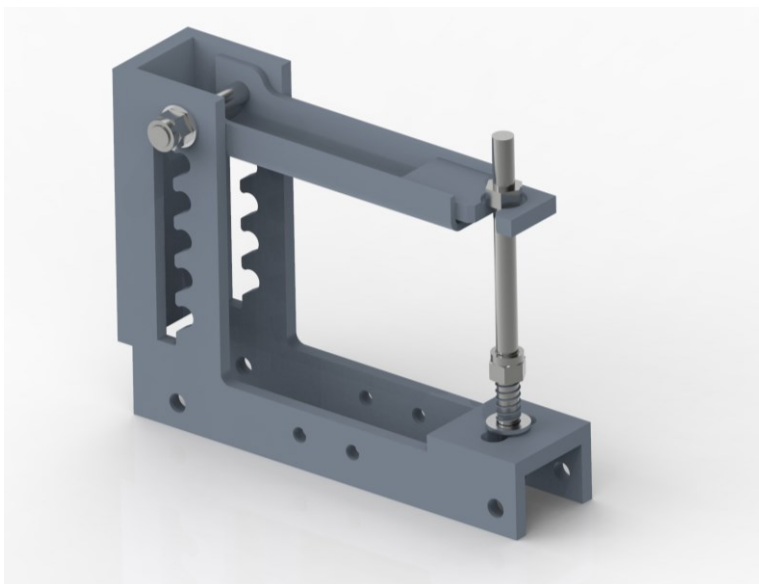
Kuva 29 Voima-anturin kiinnitys

Holkin ja sivutukien välisen välyksen säätäminen päätettiin toteuttaa säätölevyjen avulla. Anturin lukitseminen paikalleen toteutettiin kiinnityslaipan avulla, jonka avulla estettiin anturin pyörähtäminen mittaustapahtuman aikana. Kiinnityslaippa lukittiin paikalleen kahden pultin avulla.

5.3.10 Keino-oksen tuenta ja kiinnitys

Karsintatapahtuman toistettavuuden varmistamiseksi mittauslaitteistoon suunniteltiin keino-oksalle lukitusmekanismi. Mekanismi toteutettiin, niin että keino-oksen ei olisi mahdollista liikkua karsintatapahtuman aikana, eikä tällöin karsintavoiman arvo pääsisi vääristymään.

Mekanismi päätettiin toteuttaa mekaanisesti lukittavana kiinnityksenä osatoimintojen pisteytystaulukon mukaisesti. Kyseiseen ratkaisuun päädyttiin myös sen helppokäyttöisyyden vuoksi. Keino-oksen lukituksia asetettiin mittauslaitteistoon kaksi kappaletta. Ensimmäisen kiinnityksen paikka valittiin mahdollisimman lähelle karsintatukea, jotta keino-oxsa saataisiin tuettua mahdollisimman tiukasti karsintatukea vasten. Toinen asetettiin mittalaitteiston takaosaan. Suunniteltu lukitusmekanismin kokoonpano on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30 Lukitusmekanismi

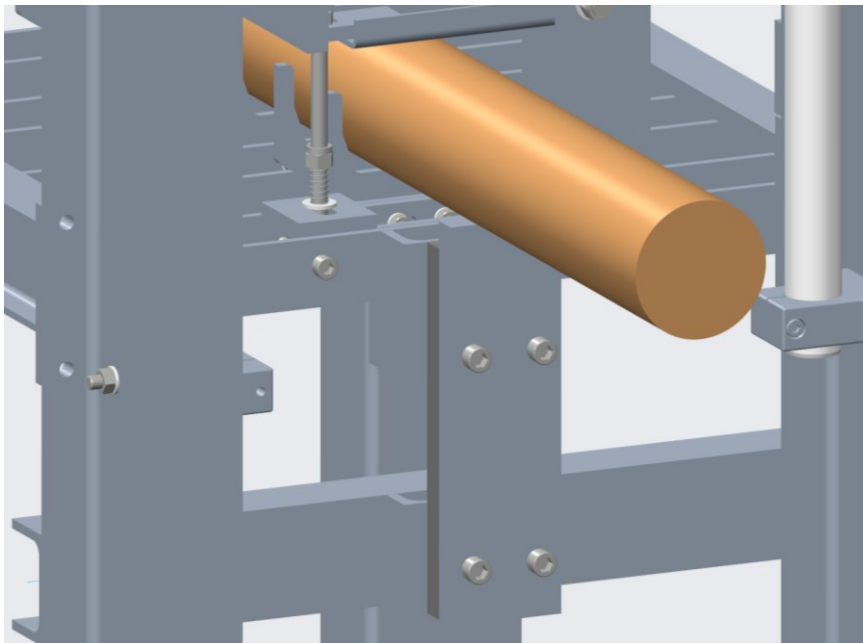
Alkuperäisessä suunnitelmassa mittauslaitteistoon oli tarkoitus suunnitella kulmansäätömekanismi, jonka avulla katkaistavan oksan kulmaa olisi voitu säätää. Tällöin teräprofiilien käyttäytymistä olisi voitu tarkastella myös vinoissa leikkaustilanteissa. Kulmansäätömekanismista kuitenkin luovuttiin ja päätettiin, että tarvittaessa kulmansäätö toteutetaan erillisten säätöpalojen avulla tai teräprofiilia muokkaamalla.

Lukitusmekanismien lisäksi karsittavalle oksalle suunniteltiin sivutuet, joita vasten oksa puristettaisiin lukitusmekanismien avulla. Sivutukia tuli mittauslaitteistoon seitsemän kappaletta, ja ne kiinnitettiin laitteiston runkoon ruuviliitoksilla. Suunnitellun sivutuen 3D-malli on esitetty alla olevassa kuvassa 31.



Kuva 31 Oksan sivutuki

Varsinaista mittaustapahtumaa varten oksalle suunniteltiin säädettävä tuenta ja sen kiinnitykset tehtiin ruuviliitoksilla eturungon UPE-palkkeihin. Tuennan taakse asetettiin kaksi 10 mm teräslevyä, joiden avulla tuennan etäisyyttä karsintaterästä voitiin säätää. Säätovaraksi asetettiin väli 10–30 mm. Lisäksi teräprofiilin kiinnityksiin jätettiin säätovaraa 20 mm, jotta kaarevan teräprofiilin käyttö myöhemmässä vaiheessa olisi mahdollista. Karsinnan tuenta on esitetty alla olevassa kuvassa 32.



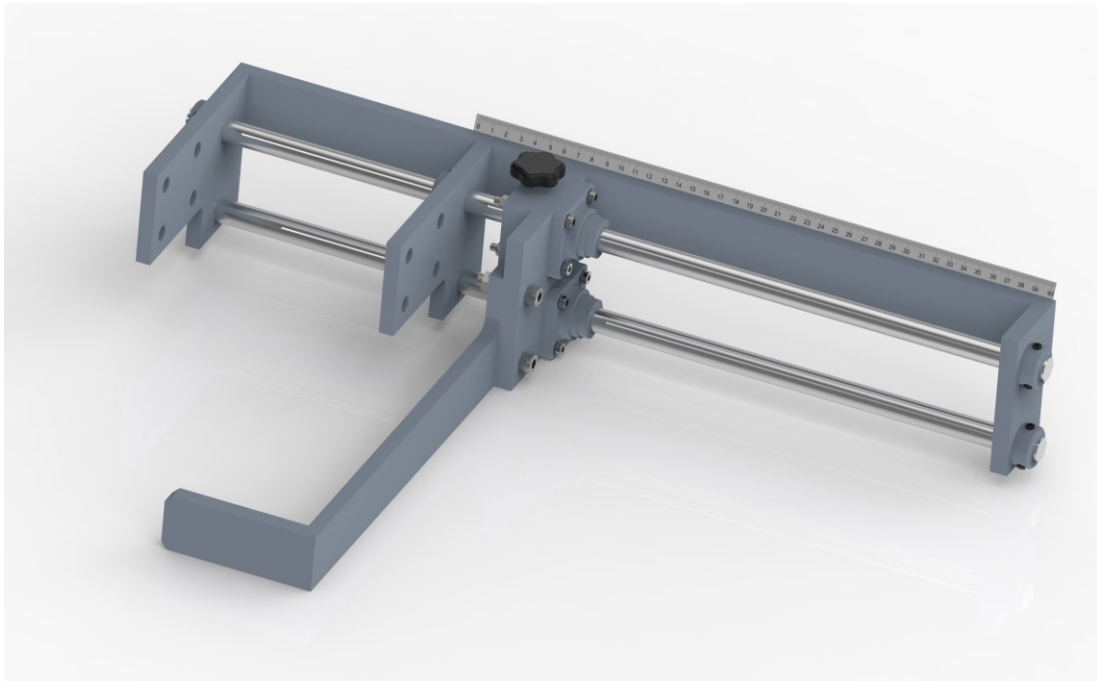
Kuva 32 Karsinnan tuenta

Jotta mittauslaitteistossa käytettävä oksa ei pääsisi liikkumaan mittaustapahtuman aikana, karsinnan tuentapalaan suunniteltiin lovi. Loven tarkoituksena oli kohdistaa käytettävä keino-oxa karsintalinjan keskelle. Suunnittelussa huomiointiin eri kokoisten oksien halkaisijat, ja niiden asettuminen tuentaan.

5.3.11 Pituudensäätömekanismi

Mittaustapahtuman nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi mittauslaitteiston yhteyteen suunniteltiin pituudensäätömekanismi, jonka avulla katkaistavan oksan pituus olisi nopeasti säädettävissä, ilman erillistä mittalaitetta. Pituudensäädön ei tarvinnut olla tarkka, vaan mittaustarkkuudeksi riitti 1 cm:n tarkkuus.

Pituudensäädölle asetettiin rajat molempiin pätyihin. Lyhyimmäksi katkaisupituudeksi asetettiin 50 mm ja suurimmaksi katkaisupituudeksi 350 mm. Liukumekanismin lukitus toteutettiin kiristettävän säätökahvan avulla. Mekanismin suunnittelussa pyrittiin hyödyntämään samoja materiaalivahvuuksia kuin varsinaisessa mittalaitteistossa, jotta välttyttäisiin turhalta materiaalin hankkimiselta. Suunnitellun pituudensäätömekanismin kokoonpano on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33 Pituudensäätömekanismi

Valmiita osto-osia pituudensäätömekanismissa kokoonpanossa olivat lukitusrenkaat, säätökahva sekä kuulaholkit. Lisäksi mitta-asteikkona käytettiin tavallista teräsviivoitinta, joka kiinnitettiin pituudensäätömekanismin runkoon kahdella pultilla.

5.3.12 Mittauslaitteiston lujuustarkastelu

Mittauslaitteiston rakennetta tarkasteltiin kehittelyvaiheen loppuun FEM-analyysin avulla. Rakenteita tarkasteltiin laitteen toiminnan kannalta kriittisimmistä kohdista. Näitä olivat rungon etuosan poikittaissuuntaiset palkit, sylinterin kiinnityksen tukilevyt sekä karsintaterän liukumekanismin komponentit.

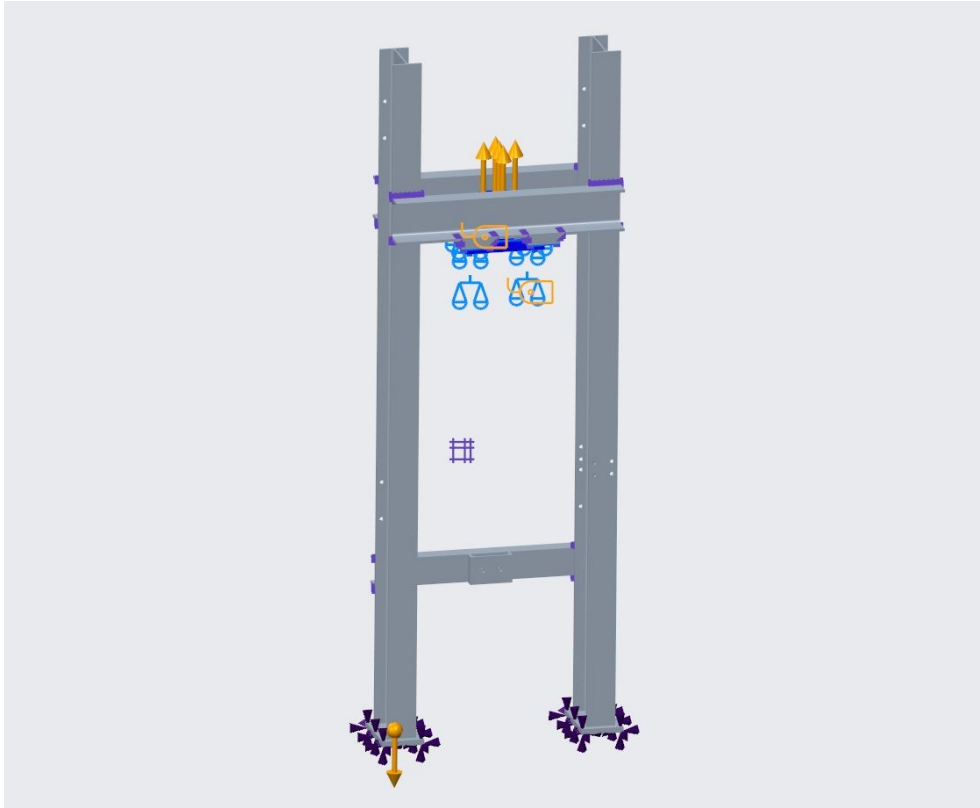
Materiaalina jokaisessa mittauslaitteiston komponentissa käytettiin S355J2 rakenneterästä.

Kaikissa tapauksissa tuloksia tarkasteltiin ensin ajamalla lujuusanalyysit kevyemmällä SPA-analyysillä, jonka jälkeen tarkasteltiin jännityksien, siirtymien sekä pintapaineiden suuruusluokkia. Kun analyysin tuloksien voitiin todeta olevan realistisia sekä hyväksyttäviä, ajettiin samat lujuustarkastelut vielä MPA-analyysillä, jolloin tuloksista saatiin entistäkin luotettavampia.

Ensimmäisenä tarkasteltiin mittauslaitteiston eturunkoa, johon kohdistui sylinterin työntövoiman aiheuttama kuormitus. Runkoa muokattiin FEM-analyysia varten yksinkertaistamalla palkkirakenteiden liitoksia. Lisäksi rungon hitsausliitokset mallinnettiin lasketun a-mitan mukaisesti.

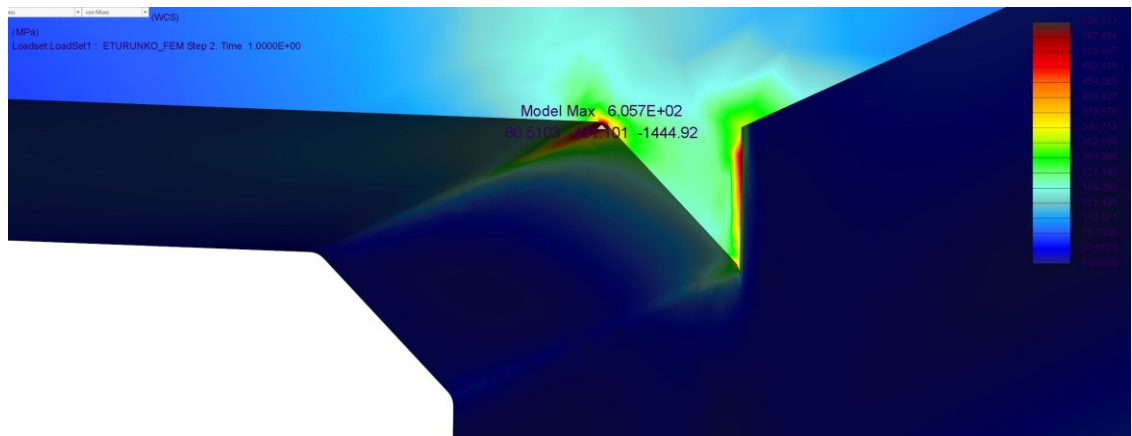
Hitsausliitosten reunoihin lisättiin tehollisen lovijännitys -menetelmän mukaisesti säteeltään 1 mm:n pyöritykset, jotta FEM-analyysissä esiintyvien jännityskeskittymien esiintymistä saatiin vähennettyä. Tavallisesti terävät reunat aiheuttavat lujuustarkastelussa jännityskeskittymiä, vaikka ne eivät olisikaan todellisia. Eturungon FEM-analyysissä runkopalkkeja hitsausliitoksineen käsiteltiin yhtenä osana, ja sylinterin yksinkertaistettu mallinnus tuotiin analyysin kokoonpanoon erillisenä osanaan.

Analyysissä tuennat asetettiin eturungon jalkoihin. Kuormittava sylinterivoima asetettiin männän pinta-alan suuruiselle alueelle kuvan 34 mukaisesti. Runkorakenteen verkotusta tihennettiin 30 mm:iin tulosten luotettavuuden parantamiseksi. Lisäksi hitsausliitoksien ja sylinterin pinnoilla verkotuksen kooksi asetettiin 4 mm.



Kuva 34 Eturungon analyysin tuennat ja kuormitukset

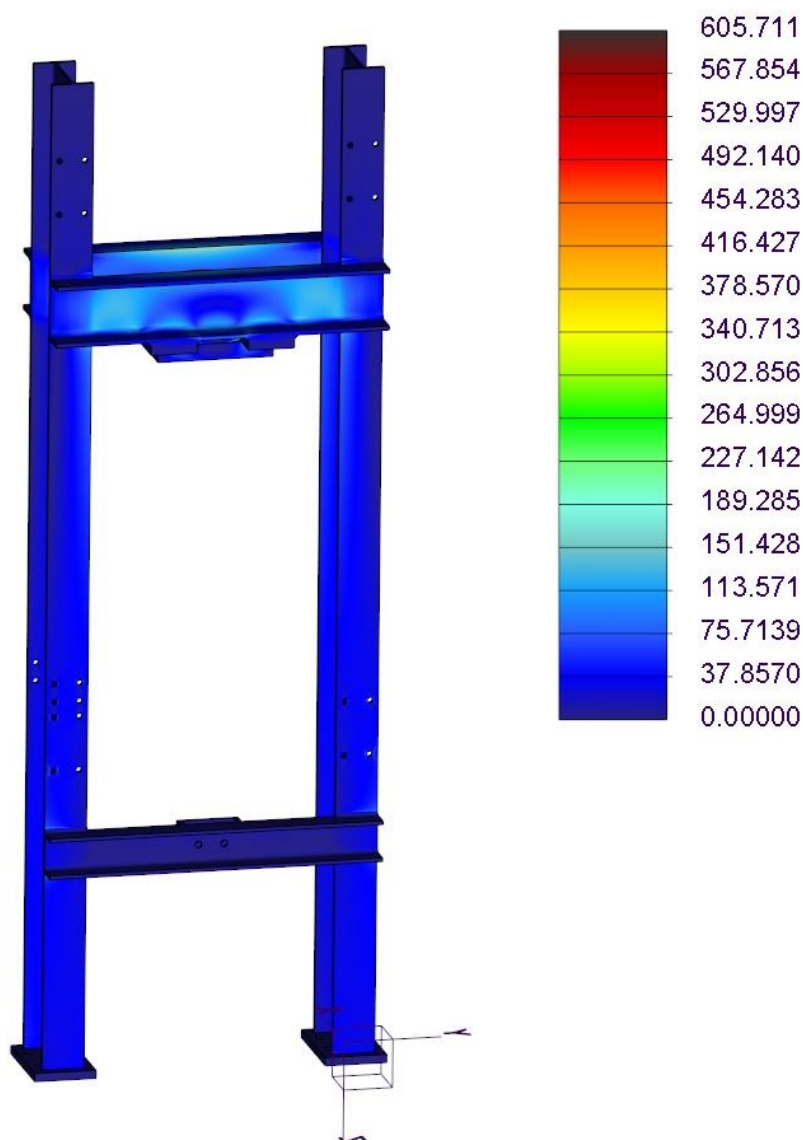
Analyysin tuloksia tarkasteltaessa huomattiin sylinterin tukilevyjen hitsausliitoksien reunoihin syntyvän suuria jännityskeskittymiä, johtuen muodostuneista singulariteeteista eli pisteisiin kohdistuvista voimista, joiden jännitykset nousevat teoriassa äärettömiksi. Kyseinen ilmiö johtuu siitä, ettei pisteillä ole pinta-alaa. Alapuolella olevassa kuvassa 35 on esitetty esimerkki hitsausliitoksessa esiintyvistä jännityskeskittymästä.



Kuva 35 Hitsausliitoksen jännityskeskittymät

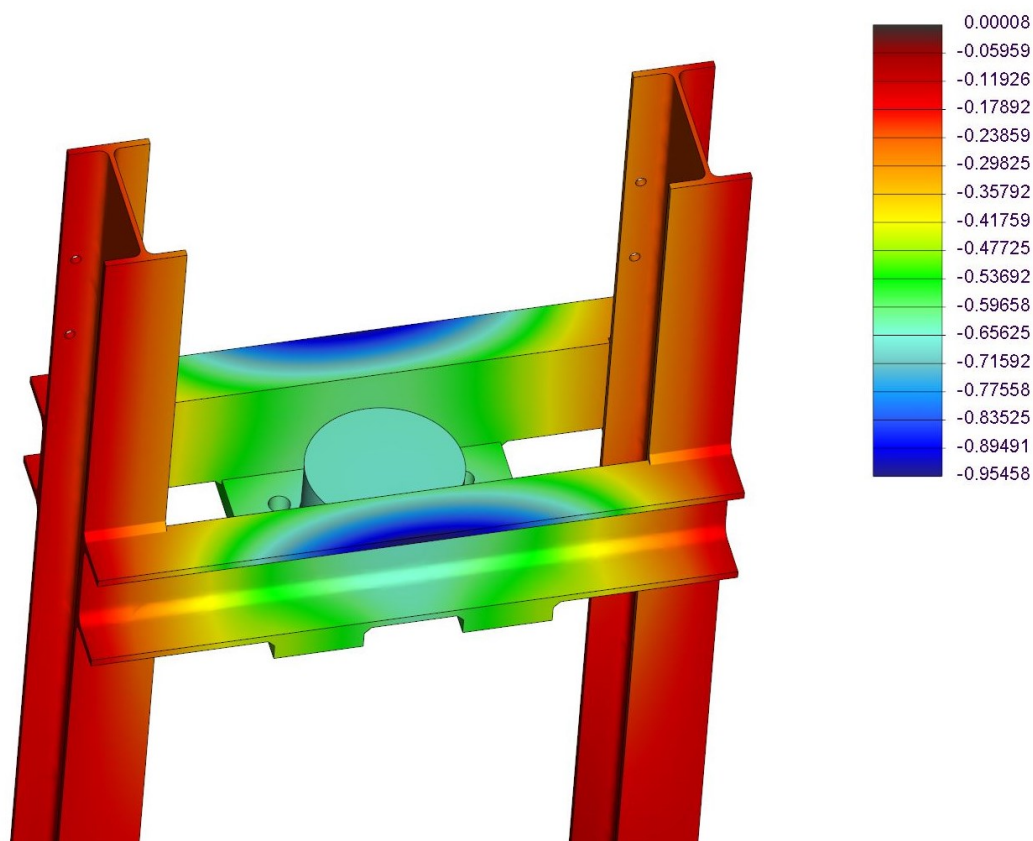
Hitsausliitoksien terävissä nurkissa esiintyvien jännityskeskittymien todettiin olevan epätodellisia ja niiden vaikutus rakenteen kestävyys jätettiin huomiotta. Muualla rakenteessa vaikuttavien jännitysten suuruuksien havaittiin pysyvän materiaalin myötörajan alapuolella, joten rungon todettiin kestävän sylinterin kuormitusta.

Hitsausliitoksien lisäksi tarkasteltiin myös muualla eturungossa vaikuttavia jännityksiä. Suurimmat jännitykset esiintyivät sylinterin kiinnityksen poikittaispalkeissa, mutta ne eivät aiheuttaneet ongelmia rakenteen keston kannalta, sillä jännitykset pysyivät myötörajan alapuolella. Rungon jännitys jakauma on esitetty alla olevassa kuvassa 36.



Kuva 36 Rungon vertailujännitykset

Jännitysten lisäksi tarkasteltiin siirtymiä sylinterin tukipalkeissa ja -levyissä. Siirtymien suuruudet pysyivät sylinteriä ympäröivissä rakenteissa alle millimetrin suuruisina maksimi kuormituksella, joten niiden todettiin olevan mittauslaitteiston toiminnan ja kestävyuden kannalta hyväksyttäviä. Mittauslaitteiston eturungon siirtymät on esitetty kuvassa 37.



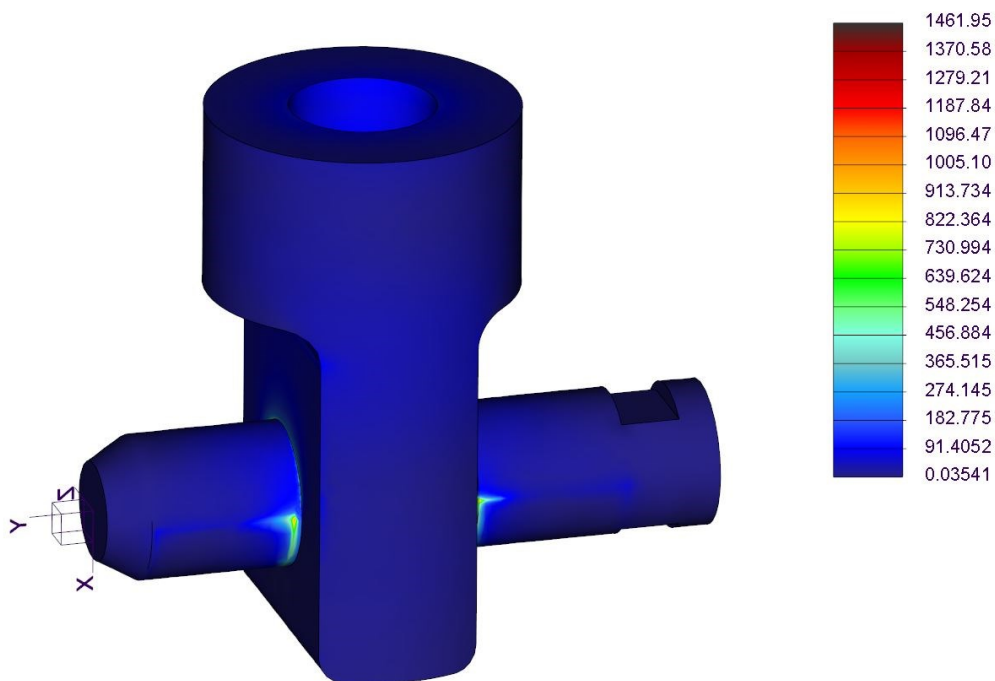
Kuva 37 Pystysuuntaiset siirtymät eturungossa

Toisena lujuustarkastelun kohteena mittauslaitteistossa tarkasteltiin liukumekanismien komponenteissa esiintyviä jännityksiä sekä mekanismeissa tapahtuvia siirtymiä kuormitustilanteessa. Tällä tavoin pyrittiin varmistamaan mekanismin kesto suurimmassa kuormitustilanteessa.

Ensimmäisenä liukumekanismien komponenteista tarkasteltiin sylinteriin kiinnitetävän holkin kestävyyttä kuormitustilanteessa. Lisäksi saman analyysin yhteydessä tarkasteltiin holkin läpi tulevan anturin aiheuttamia pintapaineita holkin reiän pinnoilla.

Tuenta asetettiin anturin alapuolen pinnoille todellisen tuennan mukaisesti ja kuormitus holkin koneistetun reiän sisäpinnalle. Holkin ja anturin välille luotiin kontaktipinnat, jotta niiden välistä pintapainetta voitiin tarkastella. Lisäksi holkin sivupintaan asetettiin tuenta y-suunnassa, jolla rajoitettiin holkin liukuminen anturin pinnalla analyysin aikana. Tällöin saatiin varmistettua tulosten oikeanmu-
kaisuus.

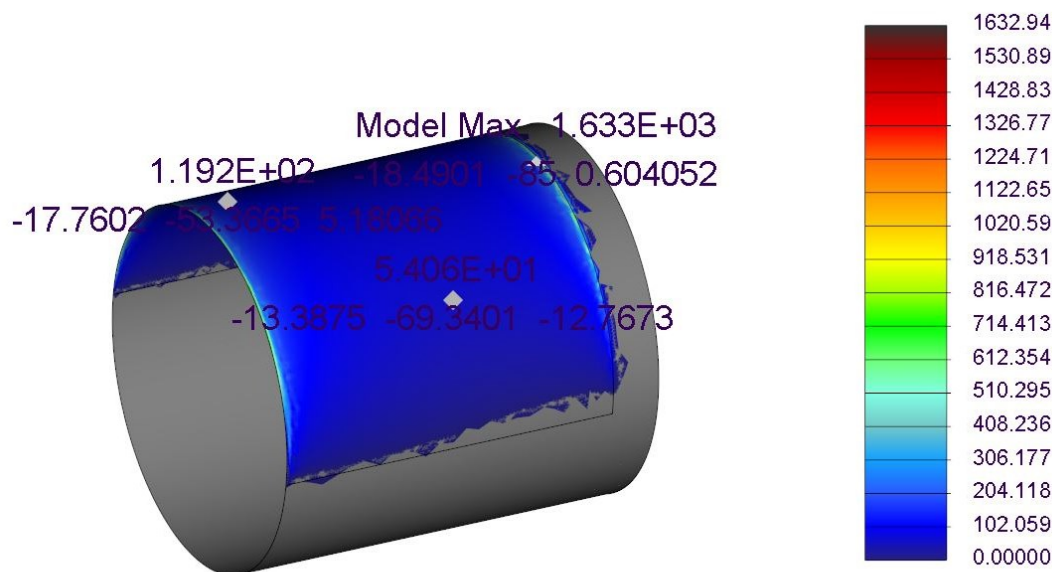
Holkissa esiintyvien jännityksien suuruus pysyi maksimi kuormituksella alle 160 MPa:ssa lukuun ottamatta holkin reiän reunoissa esiintyviä jännityskeskittymiä. Reiän terävien reunojen aiheuttamat singulariteetit jätettiin huomioimatta holkin kestävyyttä tarkasteltaessa. Holkin kuormituksen alainen jännitysjaakauma on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38 Holkin jännitysjaakauma

Pintapaineen tarkastelua varten holkin reiän sisäpintojen sekä anturin pinnan verkotusta tihennettiin hyvin pieneksi, jotta analyysin tuloksia voitiin pitää luotettavina. Pintapainetta tarkasteltaessa arvojen todettiin pysyvän myötörajan alapuolella lukuun ottamatta teräviin reunoihin muodostuvia jännityskeskittymiä.

Voitiin siis todeta holkin kestävän pintapaineen vaikutuksen. Holkin ja voima-anturin välinen pintapaine on esitetty alla olevassa kuvassa 39.

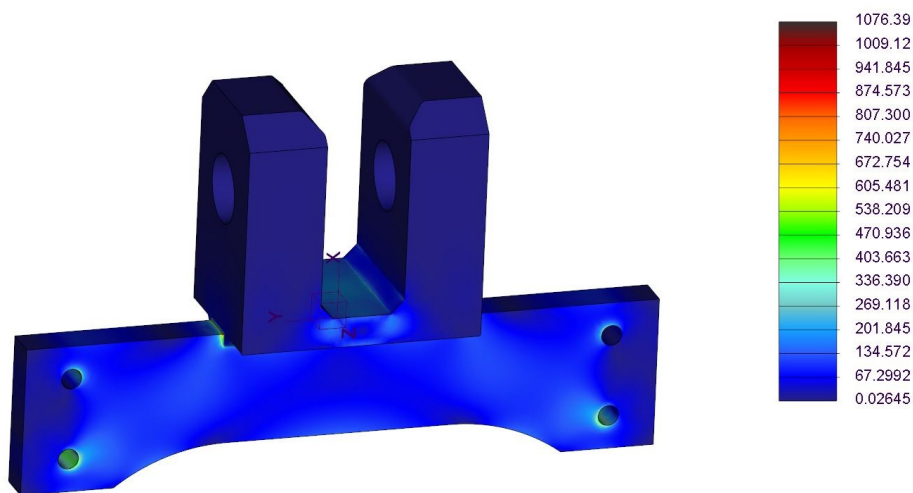


Kuva 39 Pintapaine anturin ja holkin välillä

Toisena komponenttina liukumekanismista tarkasteltiin poikittaistankoa, jonka kautta sylinterin voima välitettiin karsintaterän kiinnityksille. Poikittaistangon analyysissä tarkasteltiin lähinnä vertailujännityksen suuruuksia suurimmalla sylinterin työntövoimalla.

Analyysiä varten verkotusta tihennettiin poikittaistangon pinnoilla. Tuenta asetettiin tangon kiinnitysreikiin, ja kuorma kohdistettiin pystysuunnassa poikittaistankoon.

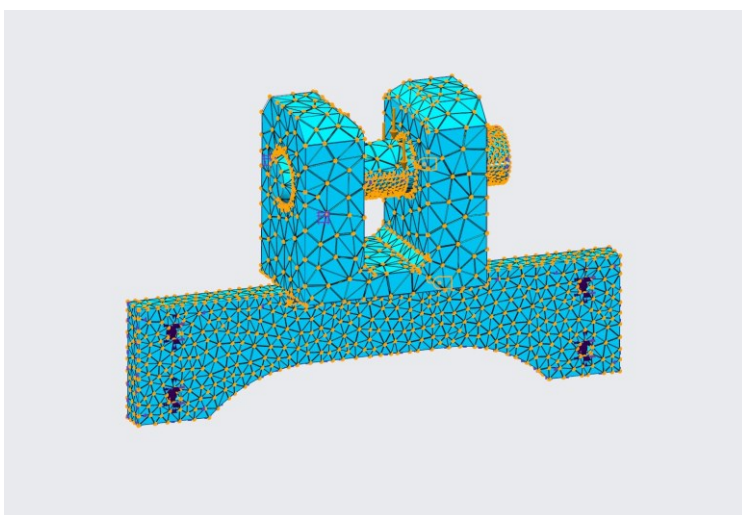
Poikittaistangossa vaikuttavien jännitysten havaittiin vaihtelevan välillä 50–250 MPa, jolloin käytettävän materiaalin myötöraja ei ylittynyt. Myös tässä kuormitustapauksessa hitsaussaumoissa esiintyi jännityskeskittymiä, joita ei huomioitu rakenteen kestävyyttä arvioitaessa. Poikittaistangon jännitys jakauma on esitetty kuvassa 40.



Kuva 40 Jännitysjaakauma poikittaistangossa

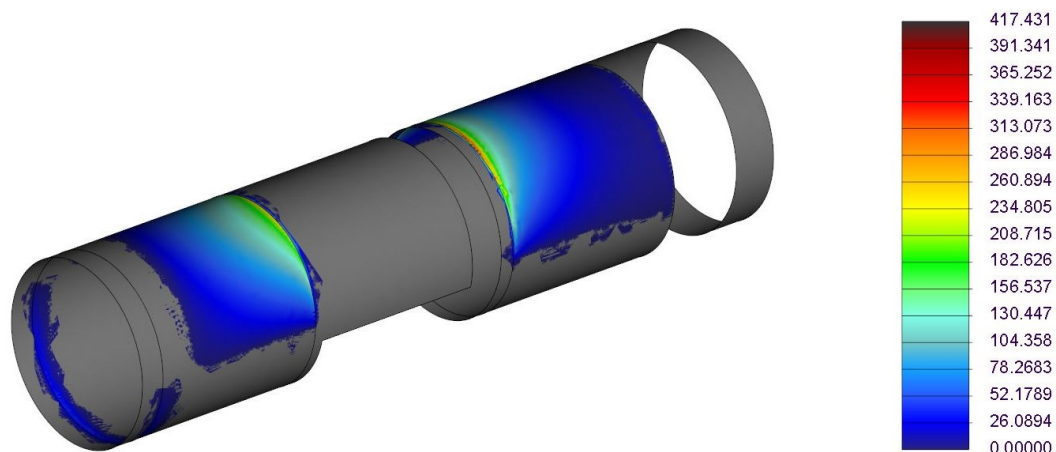
Poikittaistankoa tarkasteltiin myös kokoonpanona, jossa anturi oli kiinnitetty paikalleen. Tämän analyysin tarkoituksena oli tarkastella anturin ja sen kiinnitysreikien välistä pintapainetta.

Analyysissä kuormitus asetettiin anturin yläpinnalle sylinterin holkin kosketuspinnan suuruiselle alueelle todellisen kuormitustilanteen mukaisesti. Tuenta asetettiin samalla tavoin kuin pelkkää poikittaistankoa tarkasteltaessa. Lisäksi anturille asetettiin sivusuunnassa tuenta anturin todellisen kiinnityksen mukaisesti. Verkotusta tihennettiin anturin sekä reikien sisäpinnoilla tuloksien luotettavuuden parantamiseksi. Analyysissä käytetty verkotus on esitetty alla kuvassa 41.



Kuva 41 Poikittaistangon ja anturin verkotus

Analyysin tuloksena saadut pintapaineen arvot vaihtelivat noin 20–130 MPa:n välillä, jolloin pysyttiin reilusti materiaalin myötörajan alapuolella. Myös tässä kuormitustilanteessa teräviin reunoihin muodostui jännityskeskittymiä, joiden vaikutus voitiin jättää huomioimatta kosketuspintojen kestävyyttä arvioidessa. Anturin ja kiinnitysreikien välillä vallitseva pintapaine on esitetty alla olevassa kuvassa 42.



Kuva 42 Anturin ja kiinnitysreikien välinen pintapaine

Viimeiseksi tarkasteltiin koko liukumekanismia ja siinä tapahtuvia muodonmuutoksia. Pääpaino mekanismin tarkastelussa asetettiin mekanismin kuormitustilanteesta aiheutuville siirtymille etenkin sivusuunnissa. Tällä tavoin voitiin tutkia kuinka paljon kuormitusta liukuholkki ja niiden johteet joutuisivat ottamaan vastaan.

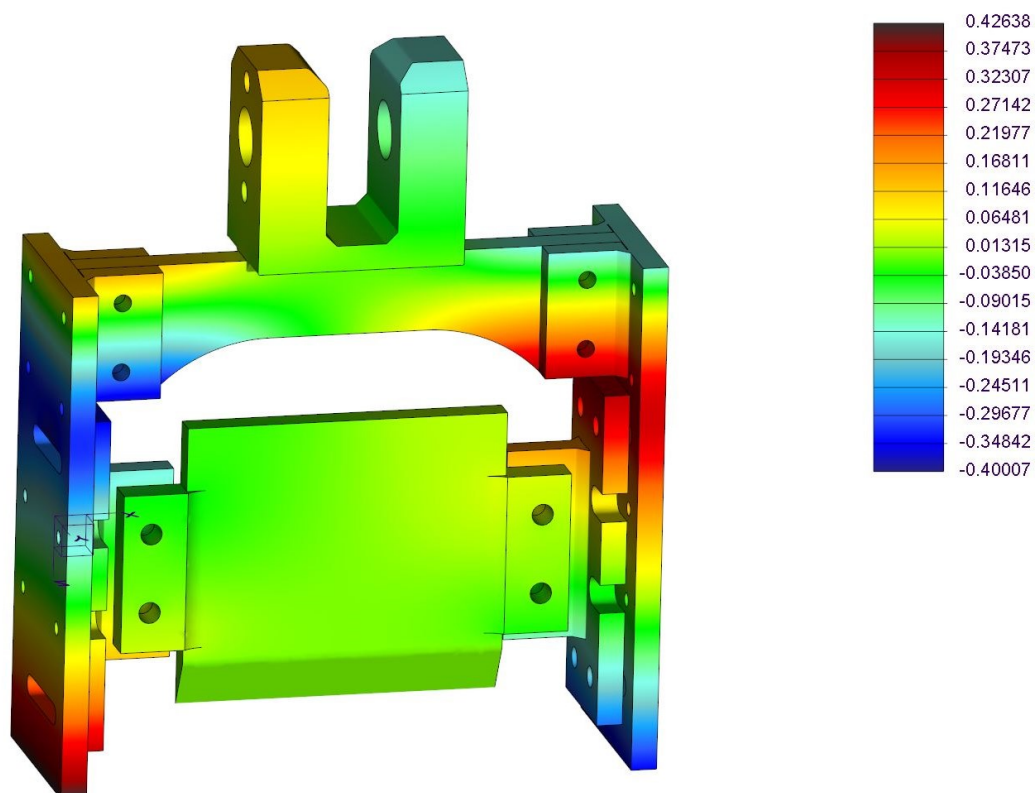
Analyysiä varten liukumekanismien komponentteja yksinkertaistettiin, jolloin laskentaa saatiin kevennettyä, ja mahdollisten virheiden määrä saatiin mahdollisimman pieneksi. Kaikki hitsausliitoksilla yhdistetyt komponenttien kokoonpanot muokattiin osiksi ja niihin mallinnettiin hitsausliitokset, joiden teräviin reunoihin lisättiin 1 mm:n pyöristykset. Pyöristyksillä pyrittiin vähentämään esiintyviä jännityskeskittymiä.

Luodut yksinkertaistetut komponentit yhdistettiin kokoonpanoksi ja niiden välille asetettiin tarvittavat liitokset ja kontaktipinnat. Kokoonpanon verkotusta

tihennettiin laskennan luotettavuuden parantamiseksi. Komponenttien materiaaliksi asetettiin S355J2.

Kokoonpanon analyysissä tuenta asetettiin teräaihion leikkauspinnalle ja sylinterin työntövoima kohdistettiin anturin kiinnityksen reikien sisäpinnoille. Liukuholkkeihin kiinnitettävien sivulevyjen annettiin olla vapaana analyysissä. Tulokista tarkasteltiin sivuttaissuunnassa tapahtuvaa siirtymää, jonka todettiin olevan merkittävin tekijä mittauslaitteen toiminnan kannalta.

Sylinterin maksimivoimalla tarkasteltaessa mekanismin siirtymät sivuttaissuunnassa pysyivät hyvin maltillisina, joten tulosten nojalla voitiin todeta, etteivät mekanismeissa tapahtuvat siirtymät vaikuta mittauslaitteiston toimintaan. Lisäksi lopullisessa liukumekanismin kokoonpanossa sivulevyjen kiinnitys toteutettiin liukuholkkeihin, jolloin mekanismi oli huomattavasti jäykempi, ja analyysissä tarkasteltujen siirtymien syntyminen oli tällöin estetty. Liukumekanismissa tapahtuvat siirtymät on esitetty kuvassa 43.



Kuva 43 Liukumekanismin siirtymät sivusuunnassa

Lujuustarkastelussa rakenteita tarkasteltiin suurimmalla mahdollisella sylinterin työntövoimalla, jota ei hyvin todennäköisesti tulisi käyttää todellisessa mittaustilanteessa. Myös tämä seikka otettiin huomioon rakenteiden kestoja arvioitaessa. Hyvin todennäköisesti tarvittavat karsintavoiman suuruudet saattavat nousta mittaustapahtuman aikana vain noin puoleen sylinterin tuottamasta maksimi voimasta, jolloin esiintyvät jännitykset ja siirtymät ovat suuruudeltaan huomattavasti pienempiä.

5.4 Viimeistelyvaihe

Suunnitteluprosessin viimeistelyvaiheessa mittauslaitteiston 3D-malli päivitettiin viimeisimpään versioonsa ja osista laadittiin valmistus- ja kokoonpanopiirustukset. Joitakin komponentteja paranneltiin lujuuden kannalta vahvemmiksi, ja esimerkiksi säätöjen liikerajoja hienosäädettiin vaatimusten mukaisiksi.

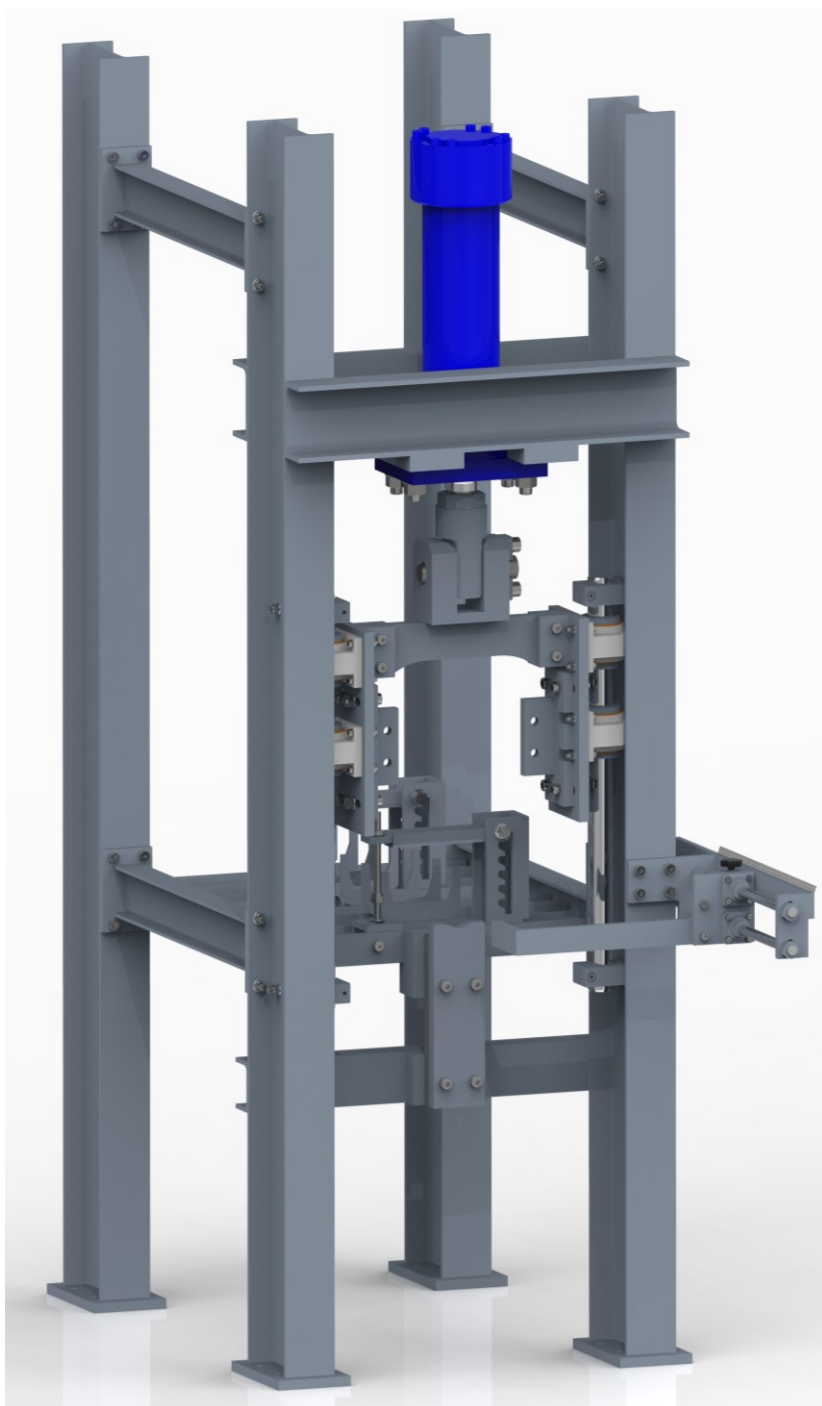
Lisäksi viimeistelyvaiheessa mittauslaitteistoa paranneltiin helppokäyttöisyyden ja ergonomian kannalta. Muutoksia tehtiin muun muassa pituudensäätömekanismiin, joka siirrettiin laitteiston toiselle puolelle, jottei se olisi tiellä karsintaterää vaihdettaessa. Lisäksi katkaistavan oksan tuennan tasoa nostettiin ylöspäin. Tällöin mittauksen valmistelu helpottui, eikä laitetta valmistelevalle henkilölle tarvinnut kurottaa lattiatasolle asettaessaan oksaa mittauslaitteistoon. Tasoa nostettiin alkuperäisestä 300 mm:stä 700 mm:iin.

Mittauslaitteistosta tehdyt valmistuspiirustukset toimitettiin suoraan Waratah OM Oy:lle, eikä niitä sisällytetty tähän opinnäytetyöhön. Valmistuspiirustuksien tekemisessä noudatettiin yleisiä teknisen piirustuksen ohjeistuksia. Apuna teknisten piirustuksien teossa käytettiin Esko Valtasen ”Tekniikan taulukkirjaa”, jossa oli koottuna viimeisimmät tekniset piirustuksen standardit.

6 Opinnäytetyön lopputulos

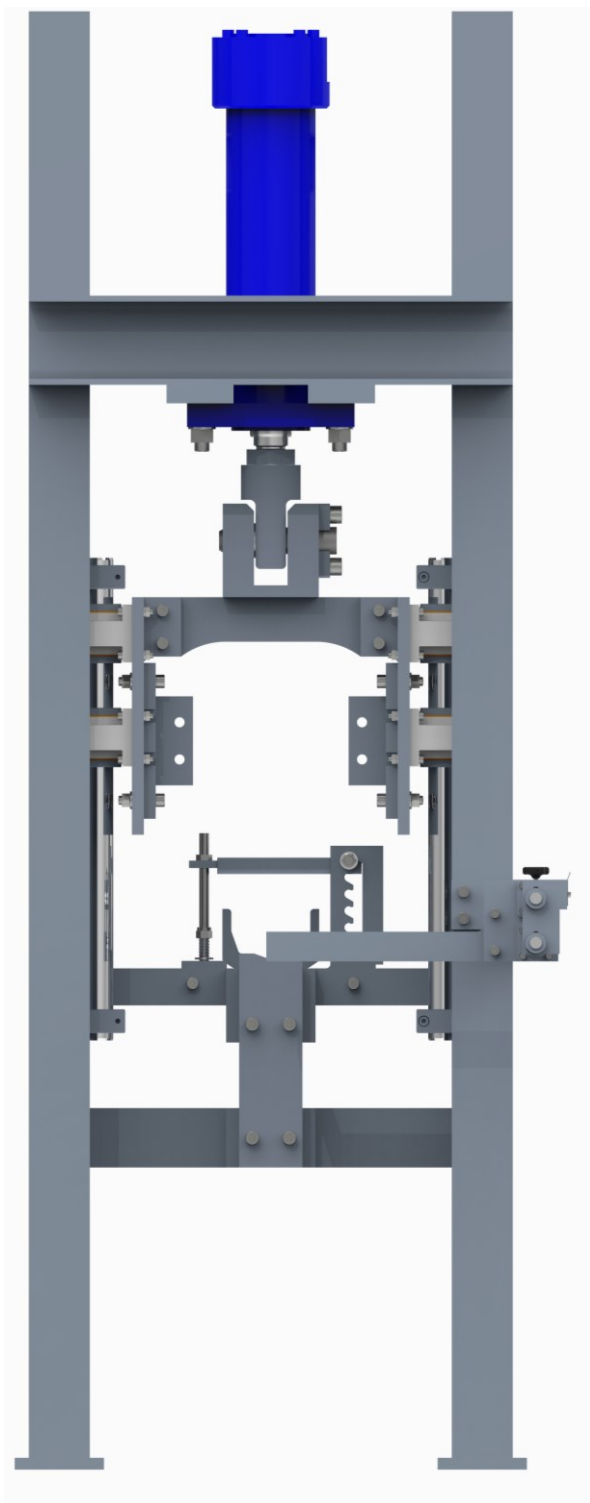
6.1 Mittauslaitteiston kokoonpano

Lopuksi mittauslaitteistosta renderöitiin kokoonpanokuvat raportointia varten. Mittauslaitteiston kokoonpano on esitetty alla olevassa kuvassa 44.



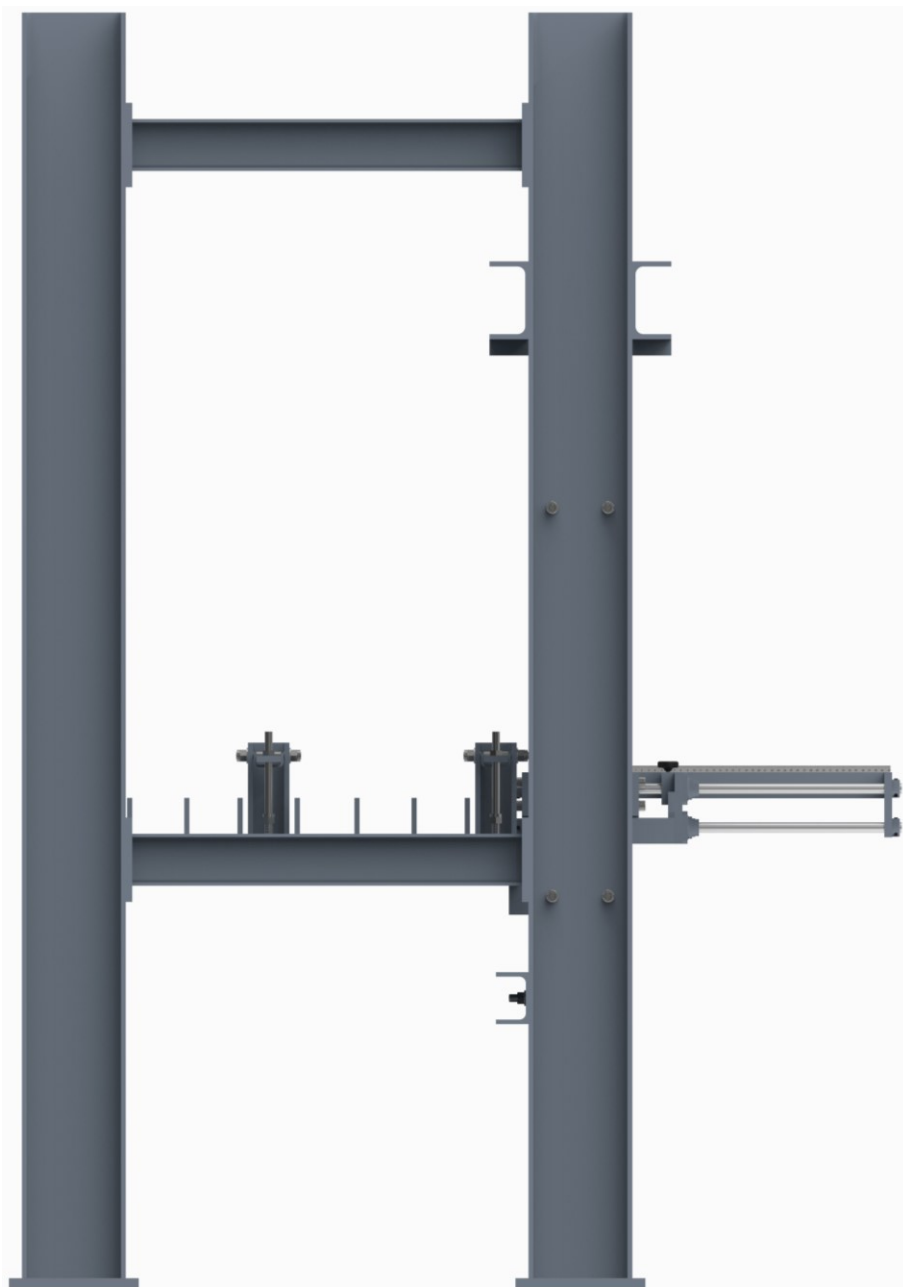
Kuva 44 Karsintavoimien mittauslaitteiston kokoonpano

Kokoonpanossa ensimmäisenä koottiin mittauslaitteiston eturunko, jonka jälkeen se yhdistettiin UPE-palkkien avulla rungon takapalkkeihin. Sivuille tulevat UPE-palkit oli ennen tätä yhdistetty toisiinsa niiden väliin tulevilla neljällä UPE-palkilla. Nämä kiinnitettiin sivupalkkeihin hitsausliitoksilla. Alla olevassa kuvassa 45 on esitetty mittauslaitteiston kokoonpano edestäpäin.



Kuva 45 Karsintavoimien mittauslaitteisto edestä

Rungon kokoamisen jälkeen mittauslaitteistoon kiinnitettiin liukujen kokoonpanot, jotka koottiin valmiiksi erillisinä kokoonpanoinaan. Niiden kiinnityksessä käytettiin ruuviliitoksia. Alla olevassa kuvassa 46 on esitetty karsintavoimien mittauslaitteiston kokoonpano sivultapäin.

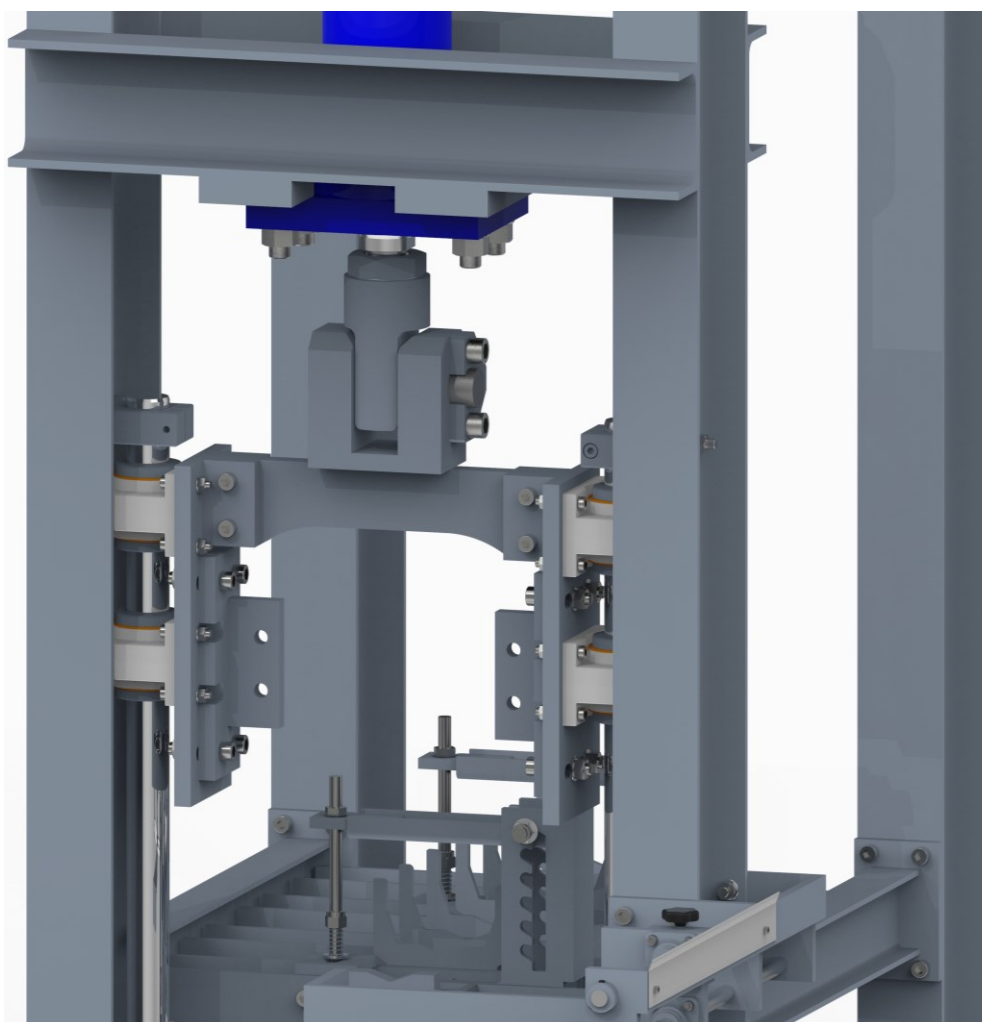


Kuva 46 Karsintavoimien mittauslaitteisto sivulta

Mittauslaitteistoon suunniteltu pituudensäätömekanismi, oksan sivutuet ja oksan lukitukset kiinnitettiin mittauslaitteiston runkoon ruuviliitoksilla. Lukitusmekanismien suunta valittiin niin, että käyttäjän oli helppo avata kiinnitykset ja liikuttaa karsittavaa oksaa eteenpäin karsintatapahtumaa valmisteltaessa.

6.2 Anturin kiinnitys ja liukumekanismi

Ennen liukujen väliin tulevaa poikittaistankoa sylinteri oli asetettava paikalleen. Tämän jälkeen sylinterin päähän tuleva holkki kierrettiin paikalleen ja säädettiin kohdalleen mutterin avulla. Lopuksi poikittaistanko asetettiin paikalleen ja se yhdistettiin holkkiin voima-anturin avulla. Liukumekanismin kokoonpano ja anturin kiinnitys on esitetty kuvassa 47.

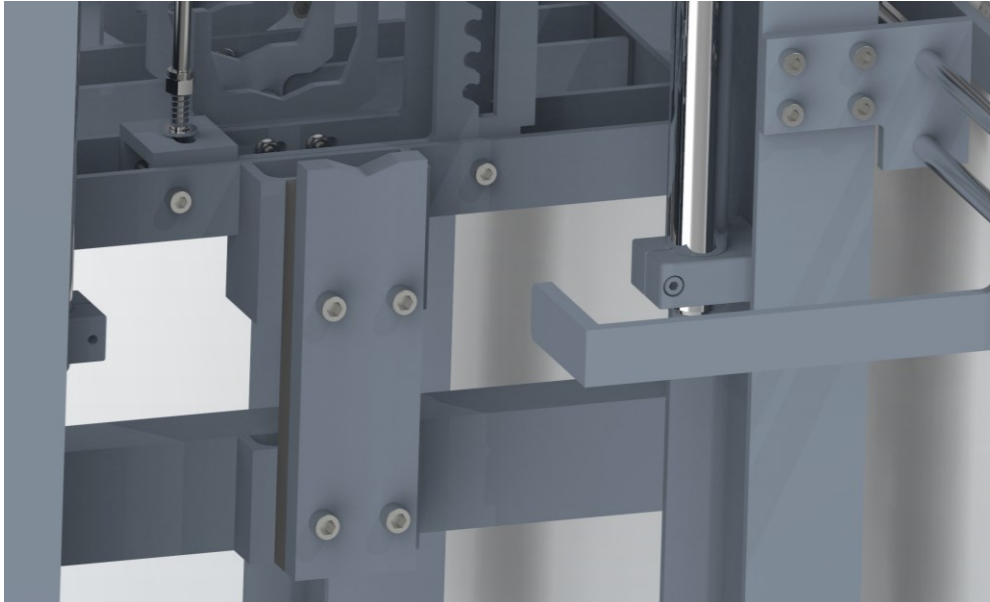


Kuva 47 Anturin kiinnitys ja liukumekanismi

Anturia paikalleen asetettaessa holkin ja poikittaistangon sivulevyjen väliin asetettiin 2 mm:n säätölevy, jonka avulla anturi saatiin kiinnitettyä sen asennusohjeen mukaisesti. Tarvittaessa välystä oli mahdollista myös muuttaa käyttämällä eri kokoisia säätölevyjä.

6.3 Karsintatuki

Karsinnan tuenta asetettiin oletuksena 10 mm:n päähän karsintaterän leikkauslinjasta. Tällä tavoin vältettiin mahdollinen törmäys mittaustilanteessa. Välys oli säädettävissä 50 mm:iin asti. Karsinnan tuenta on esitetty alla olevassa kuvassa 48.



Kuva 48 Karsinnan tuenta

Tuenta kiinnitettiin poikittaissuuntaisiin UPE-palkkeihin ruuviliitoksilla. Näin mahdollistettiin tuen nopea säätäminen sitä tarvittaessa. Suunnittelussa oli huomioitava, ettei karsintaterä ylettynyt pulttien kantojen tasolle.

7 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli suunnitella karsintavoimien mittaukseen soveltuva mittauslaitteisto, jonka avulla voitaisiin tutkia harvesterien karsintaterien profiilin vaikutusta tarvittavaan leikkausvoimaan. Pääpaino opinnäytetyössä oli mittauslaitteiston mekaniikkasuunnittelussa.

Opinnäytetyöprosessin aikana tutuksi tulivat muun muassa erilaisten standardien soveltaminen suunnittelutyössä. Lisäksi opinnäytetyön kirjallisuudessa

esitelyihin tuotekehitysmetodeihin tutustuminen toi uusia näkökulmia suunnittelutyöskentelyyn.

Mitoitusvaiheessa lasketut ruuvi- ja hitsausliitoksien käsin laskenta sekä lujuustarkastelussa hyödynnetyn FEM-analyysin käyttö palautuivat mieleen opinnäytetyön myötä. Erityisesti FEM-analyysijä tehdessä tuli kerrattua, millä tavoin erilaisia rakenteita pitäisi tarkastella, ja miten niitä kannattaisi yksinkertaistaa laskentaa keventääkseen.

Suunnitteluprosessi eteni omasta mielestäni sujuvasti, vaikka matkan varrelle osuikin muutamia ongelmakohtia. Haasteita itselleni tuottivat eniten erilaisten ratkaisuvaihtoehtojen etsiminen suunnitteluprosessin luonnosteluvaiheessa. Opinnäytetyön loppuvaiheessa haasteita tuottivat muun muassa mittauslaitteiston rakenteen lujuuslaskentavaiheessa havaitut heikkoudet, joiden myötä laitteen rakennetta jouduttiin muokkaamaan huomattavasti alkuperäisestä mallista. Muutoksia jouduttiin tekemään muun muassa sylinterin kiinnityksille sekä karsintaterän ohjausmekanismille.

Havaittuja kehittämisen kohteita omassa suunnittelutyössä tuli ilmi opinnäytetyöprosessin aikana muutamia. Muun muassa ajanhallintaa projektin aikana olisi voinut tehostaa paremmalla aikatauluttamisella prosessin alkuvaiheessa.

Opinnäytetyön tuloksena syntyneestä mittauslaitteistosta muodostui vaatimustilistan mukainen. Alkuperäiset ajatukset mittauslaitteiston rakenteesta muuttuivat hieman matkan varrella, ja esimerkiksi automaatioon ja säätömekanismeihin liittyvistä asioista luovuttiin suunnitteluprosessin aikana. Tavoiteltua karsintanopeutta ei aivan saavutettu, mutta sen todettiin riittävän kyseiseen sovellukseen.

Kokonaisuutena opinnäytetyöprosessi oli opettavainen kokemus ja palautti mieleen monia suunnittelijan tehtäviin liittyviä asioita. Vaikka haasteita ilmenikin prosessin aikana, pystyttiin ne aina tarvittaessa ratkaisemaan ja jatkamaan eteenpäin. Opinnäytetyön aikana sain hyvää ohjausta niin koulun kuin toimeksiantajan puolesta, ja siitä haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa Markko Tiaista sekä Waratah OM Oy:n edustajia Asko Hassista ja Joni Turusta.

Lähteet

1. Waratah OM. PowerPoint -esitys: Waratah OM Oy yritysesittely. 2020.
2. Outokummun Metalli. Outokummun Metalli Oy kotisivu. 2021. Päivitetty 2016. [Viitattu 19.01.2021.] Saatavissa: <https://www.outokummunmetalli.fi/yritys/waratah-om-oy/>.
3. Metsätrens. Pala metsäkonehistoriaa: Ösasta John Deereen. 2018. Päivitetty 19.04.2021. [Viitattu 31.03.2021.] Saatavissa: <https://metsatrens.com/article/359/>.
4. Waratah OM. Waratah OM Oy kotisivu. 2021. Päivitetty 28.09.2020. [Viitattu 19.01.2021.] Saatavissa: <https://www.waratah.com/fi/yrityksemme/>.
5. Hietikko, E. Tuotekehitystoiminta. Helsinki: Books on Demand. 2015. ISBN: 978-952-330-065-1.
6. Jokinen, T. Tuotekehitys. Aalto-yliopisto. 2010. Päivitetty 24.08.2012. [Viitattu 28.02.2021.] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-3320-4/>.
7. Robert Q. Riley Enterprises. Robert Q. Riley Enterprises kotisivu. 2020. Päivitetty 2020. [Viitattu 22.02.2021.] Saatavissa: <https://rqriley.com/product-design-development/>.
8. Contribyte. Contribyte Oy Kotisivu. 2021. Päivitetty 12.10.2020. [Viitattu 22.02.2021.] Saatavissa: <https://contribyte.fi/tulevaisuuden-tuotekehitys/voittava-tuoteorganisaatio/>.
9. Mertanen, J. Kurssimateriaali: Tuotekehitys koneenrakentamisessa. Karelia-ammattikorkeakoulu. 2019.
10. Jänsch, J. & Birkhofer, H. The Development of The Guideline VDI 2221 - The Change of Direction. 2006. Päivitetty 20.01.2021. [Viitattu 18.03.2021.] Saatavissa: <https://www.designsociety.org/publication/18983/>.

11. Pahl, G. & Beitz, W. Koneensuunnitteluoppi. Helsinki: Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto. 1990. ISBN: 951-817-468-7.
12. Tuomaala, J. Luova koneensuunnittelu. Tampere: Tammertekniikka ky. 1995. ISBN: 951-9004-62-9.
13. Eppinger, S. D. & Ulrich, K. T. Product Design and Development - 5th Edition. New York: McGraw-Hill. 2012. ISBN: 978-0-07-340477-6.
14. PTC. Model Based Definition. 2021. Päivitetty 30.04.2021. [Viitattu 27.03.2021.] Saatavissa: <https://www.ptc.com/en/technologies/cad/model-based-definition/>.
15. Oikeusministeriö. Valtioneuvoston asetus koneiden turvallisuudesta. 2008. Päivitetty 15.06.2011. [Viitattu 15.04.2021.] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2008/20080400#L4/>.
16. Hatton, B., Pot, G., Bouzgarrou, B.C., Gagnol, V. & Gogu, G. Experimental Determination of Delimiting Forces and Deformations in Hardwood Harvesting. 2014. Päivitetty 2017. [Viitattu 27.03.2021.] Saatavilla: <http://www.crojfe.com/archive/volume-36-no-1/experimental-determination-of-delimiting-forces-and-deformations-in-hardwood-harvesting/>.
17. Paakkunainen, M. Diplomityö: Dynamic Behavior of Delimiting Knife. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 2002.
18. Suomen Standardisoimisliitto. SFS-ISO 6020-1 Hydraulikka ja pneumatiikka. Sylinterit yksipuolisella männänvarrella. 160 bar sarja. Osa 1: Keskisarja. 2000.
19. Suomen Standardisoimisliitto. SFS-EN 1993-1-8: Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. 2005.
20. Suomen Standardisoimisliitto. SFS-EN ISO 898-1: Kiinnittimien lujuusominaisuudet. Seostamattomat ja seosteräkset. Osa 1: Ruuvien ja vaarnaruuvien lujuusluokat. Vakiokierre ja taajakierre. 2013.
21. Bosch Rexroth. KMB voima-anturi. 2021. Päivitetty 15.03.2021. [Viitattu 29.04.2021.] Saatavilla:

<https://www.boschrexroth.com/fi/fi/tuotteet/tuoteryhmaet/mobilehydrauliikka/mobile-electronics/bodas-hardware/bodas-sensors/kmb#/>.

22. Bosch Rexroth. Liukuhokki R1065. 2021. Päivitetty 2021. [Viitattu 30.04.2021.] Saatavilla:

<https://www.boschrexroth.com/fi/fi/tuotteet/tuoteryhmaet/lineaaritekniikka/linear-bushings-and-shafts/standard-linear-bushings-and-linear-sets/linear-sets-with-standard-linear-bushings/>.

Alkusuunnittelukatsaus

Tuotteen kuvaus:

- Mittauslaitteisto, jonka avulla pystytään mittaamaan karsintateriin kohdistuvia voimia ja muodonmuutoksia eri teräprofiileilla

Keskeiset tavoitteet:

- Suunnitteluprosessin tuloksena varmatoiminen mittauslaitteisto
- Kustannukset koostuvat materiaalikuluista
- Suunnitteluprosessi valmis 30.04.2021 mennessä

Markkinat:

- Tuote ainoastaan Waratah OM Oy:n omaan käyttöön

Oletukset ja rajat:

- Materiaalit valittava niin, että soveltuvat ulkokäyttöön niin kesällä kuin myös talvella
- Mittauslaitteisto oltava valmistettavissa yrityksen omassa tuotannossa
- Helposti siirrettävissä ja purettavissa

Sidosryhmät:

- Tuotanto
- Huolto-organisaatio
- Suunnittelu

Vaatusluettelo

| MUUTOS PVM. | KV, VV, T | VAATIMUS |
|--|-----------|---|
| | | 1. GEOMETRIA |
| 28.01.2021 | T | - Yksinkertainen rakenne |
| 28.01.2021 | T | - Modulaarinen |
| 28.01.2021 | KV | - Kiinnitettävissä T-urapöytään |
| 28.01.2021 | VV | - Teräpalojen ja keino-oksan kiinnitykset helposti saatavilla |
| | | 2. VOIMANTUOTTO |
| 28.01.2021 | KV | - Voimantuotto hydraulikoneikolla |
| 28.01.2021 | VV | - Voimantuotto säädettävissä |
| 03.02.2021 | KV | - Voiman mitoittaminen halkaisijaltaan 100 mm oksan mukaan |
| | | 3. MATERIAALI |
| 03.02.2021 | KV | - Raaka-aineena teräs |
| | | 4. KOMPONENTIT |
| 03.02.2021 | T | - Komponentit ensisijaisesti Waratah OM Oy:n alihankkijoilta |
| 08.02.2021 | T | - Karsintavoimien mittaus hydraulipaineesta |
| 10.02.2021 | KV | - Katkaisunopeus säädettävissä |
| 10.02.2021 | VV | - Yhdensuuntaisen voiman mittaus |
| | | 5. TURVALLISUUS |
| 28.01.2021 | KV | - Koneasetuksen mukainen |
| 10.02.2021 | VV | - Suljettu teräsrakenteisilla seinillä käytettäessä |
| 28.01.2021 | VV | - Terän/oksan vaihto oltava turvallista |
| 10.02.2021 | T | - Ympäristöystävällisyys |
| | | 6. KÄYTTÖYMPÄRISTÖ |
| 28.01.2021 | VV | - Mahdollista käyttää ulkona tai sisällä |
| 28.01.2021 | VV | - Kosteus, kylmyys tai lämpö eivät saa vaikuttaa toimintaan |
| | | 7. KÄYTTÖ |
| 08.02.2021 | KV | - Mittauksen toistettavuus pystyttävä varmentamaan |
| 28.01.2021 | VV | - Helppokäyttöisyys (mittaustapahtuma) |
| 28.01.2021 | T | - Nopeasti käytettävissä |
| 28.01.2021 | VV | - Helppo siirrettävyys |
| | | 8. VALMISTUS |
| 28.01.2021 | KV | - Valmistuspiirustukset (osat, hitsaus, kokoonpano) |
| | | 9. KUNNOSSAPITO |
| 28.01.2021 | T | - Huoltovapaa |
| 28.01.2021 | T | - Helposti puhdistettavissa |
| 28.01.2021 | VV | - Helppo korjattavuus tarvittaessa |
| | | 10. TARKASTUS |
| 28.01.2021 | VV | - Silmämääräinen tarkastus aina ennen käyttöä |
| | | 11. KUSTANNUKSET |
| 08.02.2021 | T | - Materiaalikustannukset |
| | | 12. AIKATAULU |
| 28.01.2021 | VV | - Suunnitteluprosessi valmis 30.04.2021 mennessä |
| KV = KIINTEÄ VAATIMUS, VV = VÄHIMMÄISVAATIMUS, T = TOIVOMUS | | |

Päivitetty vaatimusluettelo

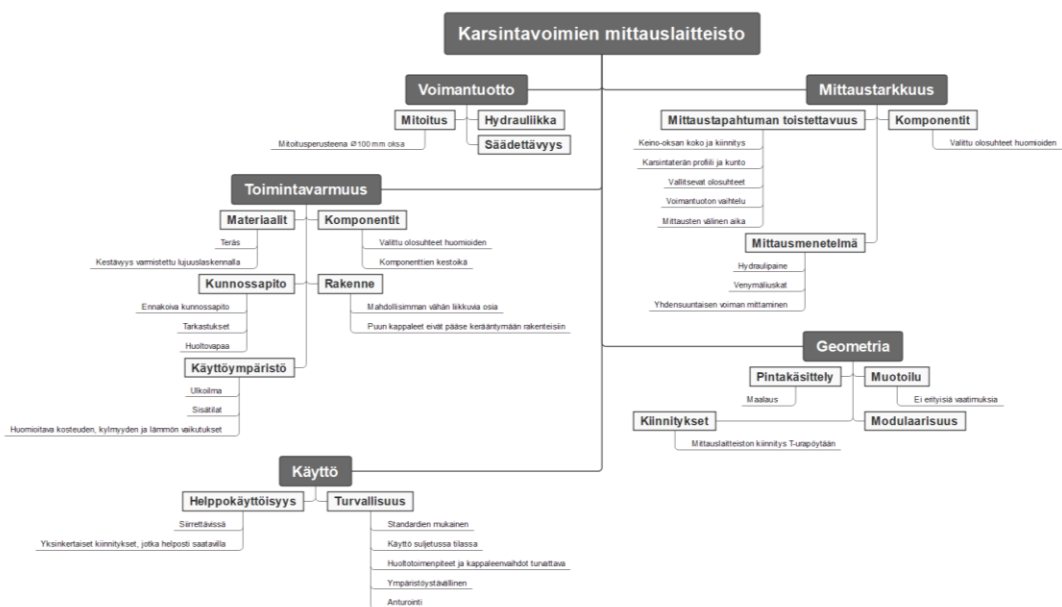
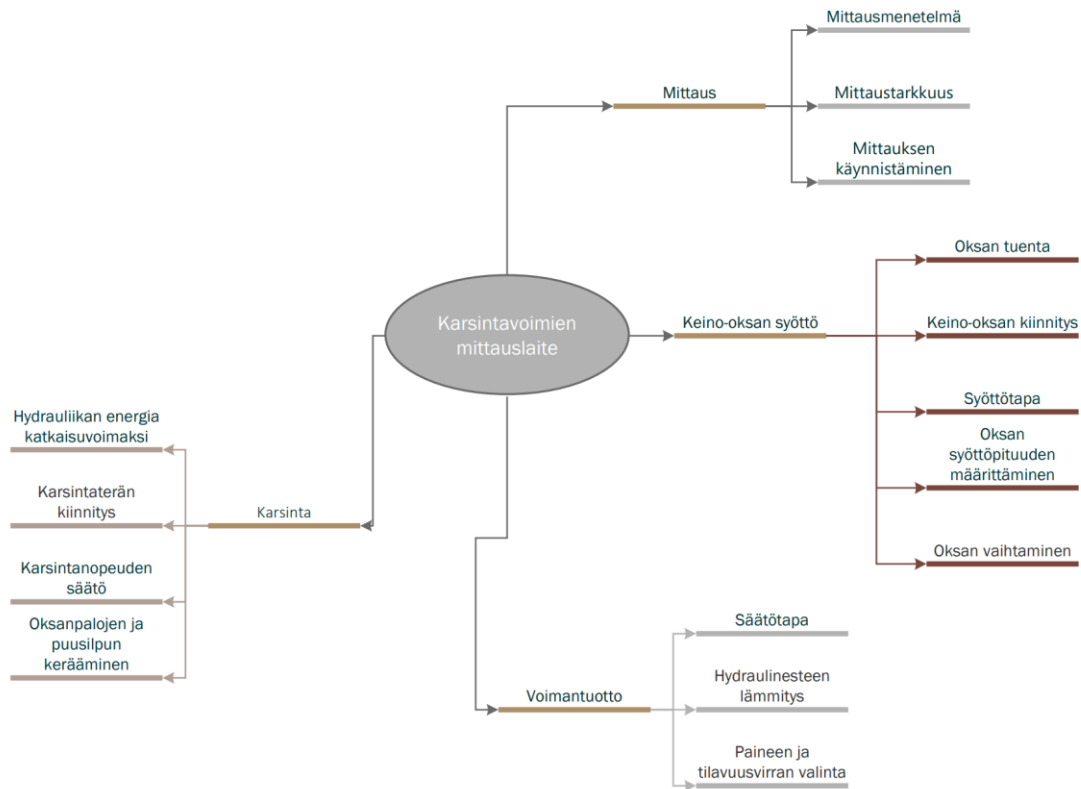
| MUUTOS PVM. | KV, VV, T | VAATIMUS |
|---------------------------|-----------|--|
| 1. GEOMETRIA | | |
| 28.01.2021 | T | - Yksinkertainen rakenne |
| 18.03.2021 | KV | - Kiinnitettävissä pulteilla teräslevypöytään |
| 28.01.2021 | VV | - Teräspalojen ja keino-oksan kiinnitykset helposti saatavilla |
| 2. VOIMANTUOTTO | | |
| 28.01.2021 | KV | - Voimantuotto hydraulikoneikolla |
| 28.01.2021 | VV | - Säädettävä voimantuotto |
| 03.02.2021 | KV | - Voiman mitoittaminen halkaisijaltaan 100 mm oksan mukaan |
| 3. MATERIAALI | | |
| 03.02.2021 | KV | - Raaka-aineena teräs |
| 17.02.2021 | KV | - Rasituksenkestävä rakenne |
| 4. KOMPONENTIT | | |
| 09.05.2021 | T | - Komponentit ensisijaisesti samalta valmistajalta |
| 09.05.2021 | T | - Karsintavoimien mittausta hydraulipaineesta ja voima-anturilla |
| 10.02.2021 | KV | - Säädettävä katkaisunopeus |
| 17.02.2021 | VV | - Voiman mittausta ainoastaan yhdensuuntaisesti |
| 5. TURVALLISUUS | | |
| 28.01.2021 | KV | - Koneasetuksen mukainen |
| 10.02.2021 | VV | - Suljettu teräsrakenteisten seinien sisälle käytön aikana |
| 28.01.2021 | VV | - Turvallinen terän/keino-oksan vaihto |
| 10.02.2021 | T | - Ympäristöystävällinen |
| 6. KÄYTTÖYMPÄRISTÖ | | |
| 28.01.2021 | VV | - Mahdollista käyttää ulkona tai sisällä |
| 28.01.2021 | VV | - Kosteus, kylmyys tai lämpö eivät saa vaikuttaa toimintaan |
| 7. KÄYTTÖ | | |
| 08.02.2021 | KV | - Mittauksen toistettavuus pystyttävä varmentamaan |
| 18.02.2021 | VV | - Ergonominen |
| 28.01.2021 | T | - Nopeasti ottaa käyttöön |
| 28.01.2021 | VV | - Helppo siirtää |
| 8. VALMISTUS | | |
| 28.01.2021 | KV | - Valmistuspiirustukset (osat, hitsaus, kokoonpano) |
| 9. KUNNOSSAPITO | | |
| 18.02.2021 | T | - Helppo huoltaa |
| 28.01.2021 | T | - Helppo puhdistaa |
| 10. TARKASTUS | | |
| 28.01.2021 | VV | - Silmämääräinen tarkastus ennen käyttöä |
| 11. KUSTANNUKSET | | |
| 08.02.2021 | T | - Materiaalikustannukset |
| 12. AIKATAULU | | |
| 09.05.2021 | VV | - Suunnitteluprosessi valmis 20.05.2021 mennessä |

KV = KIINTEÄ VAATIMUS, VV = VÄHIMMÄISVAATIMUS, T = TOIVOMUS

Alustava tuotespesifikaatio

| Vaatus | Spesifikaatio | Yksikkö | Tavoitearvo |
|---|--------------------------------|------------------------|----------------|
| Säädettävä hydraulikäyttöinen voimantuotto | Hydraulipaine | <i>MPa</i> | |
| Voiman mitoittaminen halkaisijaltaan 100 mm oksan mukaan | Tarvittava leikkausvoima | N | |
| Karsintavoimien mittaus hydraulipaineesta | Paine-ero (Meno/tulo) | <i>MPa</i> | |
| Säädettävä katkaisunopeus | Tilavuusvirta | <i>m³/s</i> | |
| Voiman mittaus ainoastaan yhdensuuntaisesti | Kohtisuora voima terään nähden | <i>N</i> | |
| Mittauksen toistettavuus pystyttävä varmentamaan | Mittauksen toistettavuus | % | |
| Mittaus vastaa todellista karsintatapahtumaa | Keino-oksen pituus | <i>mm</i> | |
| Mahdollista käyttää eri lämpötiloissa ulkona ja sisällä | Käyttölämpötila | <i>°C</i> | - 40°C – +40°C |
| Helppo siirtää | Massa | <i>kg</i> | |
| Kiinnitettävissä T-urapöytään | Kiinnitystapa | Subj. | |
| Teräpalojen ja keino-oksen kiinnitykset helposti saatavilla | Ulottuvuus | <i>mm</i> | |
| Ergonominen | Ergonominen | <i>Subj.</i> | |
| Kustannukset | Materiaalikustannukset | € | |

Osatoimintojen ideointi



Osatoimintojen ratkaisuvaihtoehdot

| | Osatoiminto | Ratkaisuvaihtoehdot | | | |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Valmistelu | Teräprofiilin kiinnitys | Pulttiliitos | Sokka | Ura/tappiliitos | Kitkakartioliitos |
| | Paineen valinta | Manuaalinen | Automaattinen | Manuaalinen ja automaattinen | - |
| | Karsintanopeuden valinta | Manuaalinen | Automaattinen | Manuaalinen ja automaattinen | - |
| Keino-oksan syöttö | Keino-oksan kiinnitys | Urassa | Rullien päällä | Hihnan päällä | - |
| | Syöttötapa | Rullat | Sylinteri | Hihna | Ketju |
| | Syöttöpituuden hallinta | Mittapyörä | Anturointi | Mekaaninen haitta | - |
| | Oksan tuenta | Kiinteä ura | Rulla | Sylinteri | - |
| Karsinta | Hydraulipaine liike-energiaksi | Hydraulisyylinteri | Hydraulimoottori | - | - |
| | Hallittu karsintaliike | Kuulajohteet | Rullajohteet | Teleskooppikiskot | Laakerointi |
| | Syntyvän puujätteen keräysmenetelmä | Tyhjennettävä säiliö | Imuri | Kerääminen maasta | - |
| Mittaus | Mittausmenetelmä | Hydrauliikan paine-ero (Meno/tulo) | Venymäliuskamentaus | Voima-anturi | - |
| | Mittaustarkkuus | 1 N | 10 N | 100 N | 1000 N |
| | Mittaustuloksen esittäminen | Analoginen | Digitaalinen | Digitaalinen ja analoginen | - |

Ratkaisumuunnelmien pisteytystaulukko

- 0 Ei toteudu
 1 Toteutuu hyvin vähäisesti
 2 Toteutuu vain osittain
 3 Toteutuu suurimmilta osin
 4 Toteutuu lähes täysin
 5 Toteutuu täysin

| RM | Ratkaisumuunnelmat | Vaatuslistan mukaisuus | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---|---|---|--|
| | | Laatukaavion mukainen | | | | Huomautuksia |
| | | Vaikutus koneturvallisuuteen | | | | |
| | | Waratah OM Oy mielpide | | | | |
| A | B | C | D | | | |
| Teräprofiilin kiinnitys | Pulttiliitos | 4 | 4 | 5 | 5 | 4,60 |
| | Sokka | 4 | 4 | 3 | 4 | 3,80 |
| | Ura/tappiliitos | 4 | 4 | 4 | 4 | 4,00 |
| | Kitkakartioliitos | 2 | 3 | 4 | 3 | 3,00 |
| Paineen valinta | Manuaalinen | 3 | 3 | 3 | 5 | 3,80 |
| | Automaattinen | 2 | 2 | 4 | 3 | 2,80 |
| | Manuaalinen ja automaattinen | 4 | 4 | 4 | 5 | 4,40 |
| Karsintanopeuden valinta | Manuaalinen | 3 | 3 | 3 | 5 | 3,80 |
| | Automaattinen | 2 | 2 | 4 | 3 | 2,80 |
| | Manuaalinen ja automaattinen | 4 | 4 | 4 | 5 | 4,40 |
| Keino-oksan kiinnitys | Urassa | 4 | 4 | 4 | 5 | 4,40 |
| | Rullen päällä | 2 | 3 | 2 | 3 | 2,60 |
| | Hihnan päällä | 1 | 2 | 2 | 3 | 2,20 |
| | Kiinnikkeiden päällä | 4 | 4 | 4 | 5 | 4,40 |
| Syöttötapa | Rullat | 3 | 4 | 3 | 3 | 3,20 |
| | Sylinteri | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,00 |
| | Hihna | 2 | 1 | 2 | 3 | 2,20 |
| | Käsin | 4 | 4 | 3 | 5 | 4,20 |
| Syöttöpituuden hallinta | Mittapyörä | 3 | 4 | 4 | 3 | 3,40 |
| | Anturointi | 4 | 5 | 4 | 3 | 3,80 |
| | Mekaaninen halitta | 4 | 4 | 3 | 5 | 4,20 |
| | Käsimentelmin mittaamalla | 4 | 4 | 3 | 3 | 3,40 |
| Oksan tuenta | Kiinteä ura | 1 | 2 | 4 | 3 | 2,60 |
| | Rulla | 2 | 1 | 3 | 3 | 2,40 |
| | Sylinteri | 4 | 4 | 4 | 3 | 3,60 |
| | Mekaaninen lukitus | 4 | 4 | 5 | 5 | 4,60 |
| Hydraulipaine liike-energiaksi | Hydraulisyylinteri | 4 | 5 | 4 | 5 | 4,60 |
| | Hydraulimoottori | 2 | 3 | 3 | 0 | 1,60 |
| | Paineilma | 0 | 0 | 4 | 0 | 0,80 |
| Hallittu karsintaliike | Kuulajohteet | 4 | 4 | 4 | 4 | 4,00 |
| | Rullajohteet | 4 | 4 | 4 | 4 | 4,00 |
| | Teleskooppikiskot | 1 | 3 | 3 | 4 | 3,00 |
| | Laakerointi | 2 | 4 | 4 | 4 | 3,60 |
| Karsintakulman säätö | Terän kääntö | 2 | 2 | 2 | 0 | 1,20 |
| | Syöttökulman säätö sylinterillä | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,00 |
| | Syöttökulman säätö käsin | 4 | 4 | 4 | 5 | 4,40 |
| Terän kulmansäätö mahdollisuudet | 1 kpl | 2 | 2 | 4 | 3 | 2,80 |
| | 2 kpl | 3 | 3 | 3 | 4 | 3,40 |
| | 3 kpl | 3 | 3 | 3 | 5 | 3,80 |
| | Enemmän kuin 3 kpl | 1 | 1 | 3 | 5 | 3,00 |
| Syntyvän puujätteen keräysmenetelmä | Tyhjennettävä säiliö | 4 | 4 | 3 | 5 | 4,20 |
| | Imuri | 2 | 4 | 4 | 0 | 2,00 |
| | Kerääminen maasta | 1 | 2 | 2 | 3 | Ergonomisuus kärsii 2,20 |
| | Ei keräystä | 3 | 2 | 1 | 0 | 1,20 |
| Mittausten menetelmä | Hydraullikan paine-ero | 4 | 4 | 5 | 4 | 4,20 |
| | Venymälluskamittaus | 3 | 3 | 3 | 4 | 3,40 |
| | Voima-anturi | 3 | 3 | 4 | 4 | 3,60 |
| Mittaustarkkuus | 1 N | 1 | 0 | 4 | 5 | Ei järkevää pyrkiä tähän tarkkuuteen 3,00 |
| | 10 N | 4 | 3 | 4 | 5 | 4,20 |
| | 100 N | 4 | 4 | 4 | 5 | 4,40 |
| | 1000 N | 2 | 0 | 3 | 3 | Mittaustulokset kärsivät 2,20 |
| Mittaustuloksen esittäminen | Analoginen | 2 | 2 | 3 | 5 | 3,40 |
| | Digitaalinen | 4 | 4 | 4 | 5 | 4,40 |
| | Analoginen ja digitaalinen | 5 | 5 | 4 | 5 | 4,80 |

Sylinteri CDM1MF1

Configuration documentation Mill type cylinder



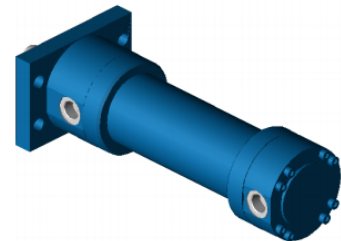
Model code CDM1MF1/100/56/250A2X/B22CGDMWW

[Link to configuration](#)

Hint: Link to configuration valid until 2021-11-08

Description

| | | |
|-------------------------|------------|--|
| Mode of operation | CD | Single rod cylinder |
| Range | M1 | Range M1 to ISO 6020/1 |
| Mounting types | MF1 | Rectangular head |
| Bore diameter | 100 | D = 100 mm |
| Piston rod diameter | 56 | d = 56 mm |
| Stroke length | 250 | mm |
| Design principle | A | Flanged head and cap |
| Component series | 2X | 20 to 29 unchanged installation and connection dimensions |
| Port connection / types | B | BSP- pipe thread - ISO 228/1 to ISO 1179-1 EE = G 1 D4 = 47 (max. 0,5 mm deep) |
| Port location at head | 2 | Right - viewed on the piston rod |
| Port location at cap | 2 | Right - viewed on the piston rod |
| Piston rod version | C | Hard chromium-plated |
| Piston rod end | G | Thread to ISO 6020/1 KK = M42x2 A = 56 NV = 46 |
| End position cushioning | D | Both sides, self adjusting Cushioning length, head end 25 mm Cushioning length, base end 25 mm |
| Seal version | M | Standard seal system (for mineral oil HL, HLP and HFA) |
| Option 1 | W | Without option |
| Option 2 | W | Without option |



Configuration documentation
Mill type cylinder



Model code CDM1MF1/100/56/250A2X/B22CGDMWW

Hint:

The information contained herein is intended to serve purely as a product description. The information we have provided cannot be used as evidence of a particular aspect or of suitability for a particular purpose. This information does not release the user from his responsibility to perform his own assessments and tests. Please note that our products are subject to the natural processes of aging and wear.

The stated operating pressures are valid for applications with shockfree operation. For extrem loads, as for example fast cycling, the mounting elements and piston rod thread connection must be designed for fatigue.

The specified resistances of the individual Bosch Rexroth classes only relate to primed/painted cylinder surfaces, not to piston rods, trunnions etc. Special measures may be required for these.

© All rights reserved by Bosch Rexroth AG, also for the event of registration of industrial property rights. All rights of disposal, such as copyright and right of distribution, reserved.

Technical Recalculation

| | |
|------------------|---|
| Mounting element | Self-aligning clevis |
| | Self-aligning clevis |
| | Fork bearing block for mounting on the piston rod with the self-aligning clevis |

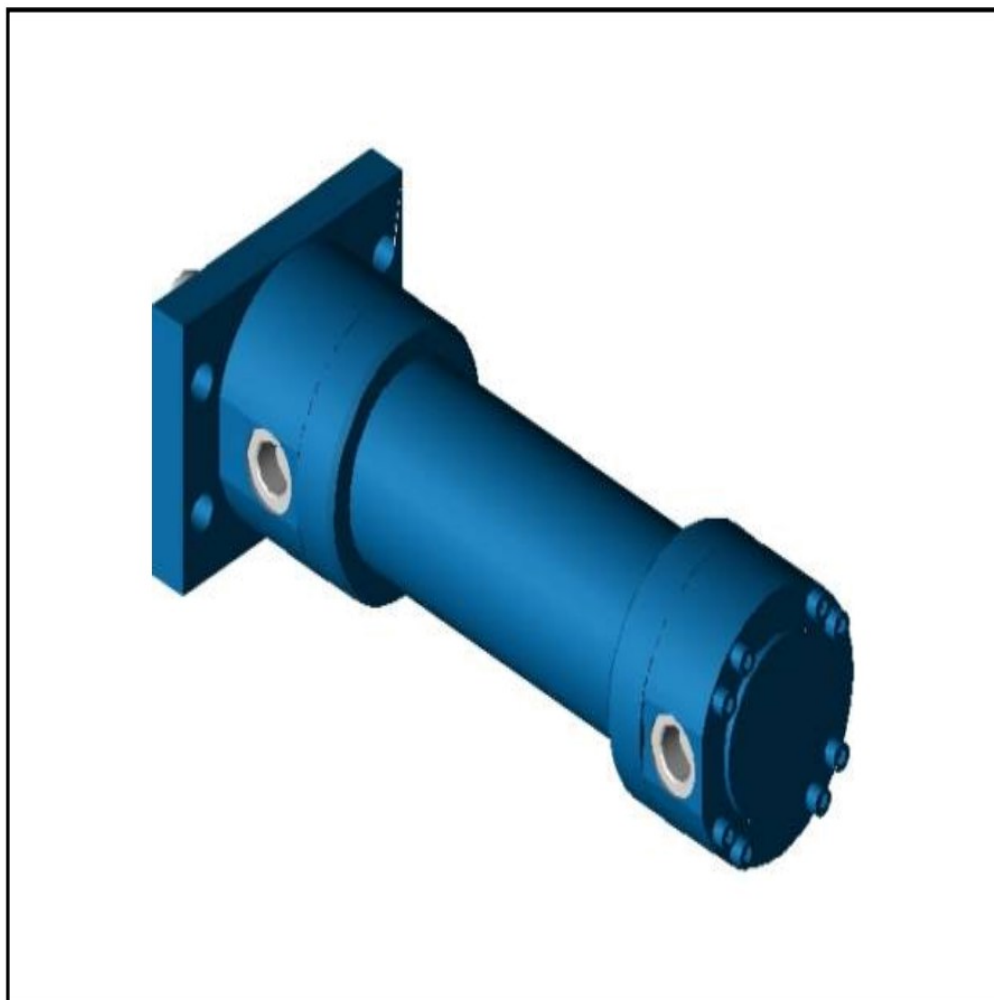
Spare parts

| Materialnummer | Designation |
|-----------------------|--------------------|
| R407026540 | |

Configuration documentation
Mill type cylinder

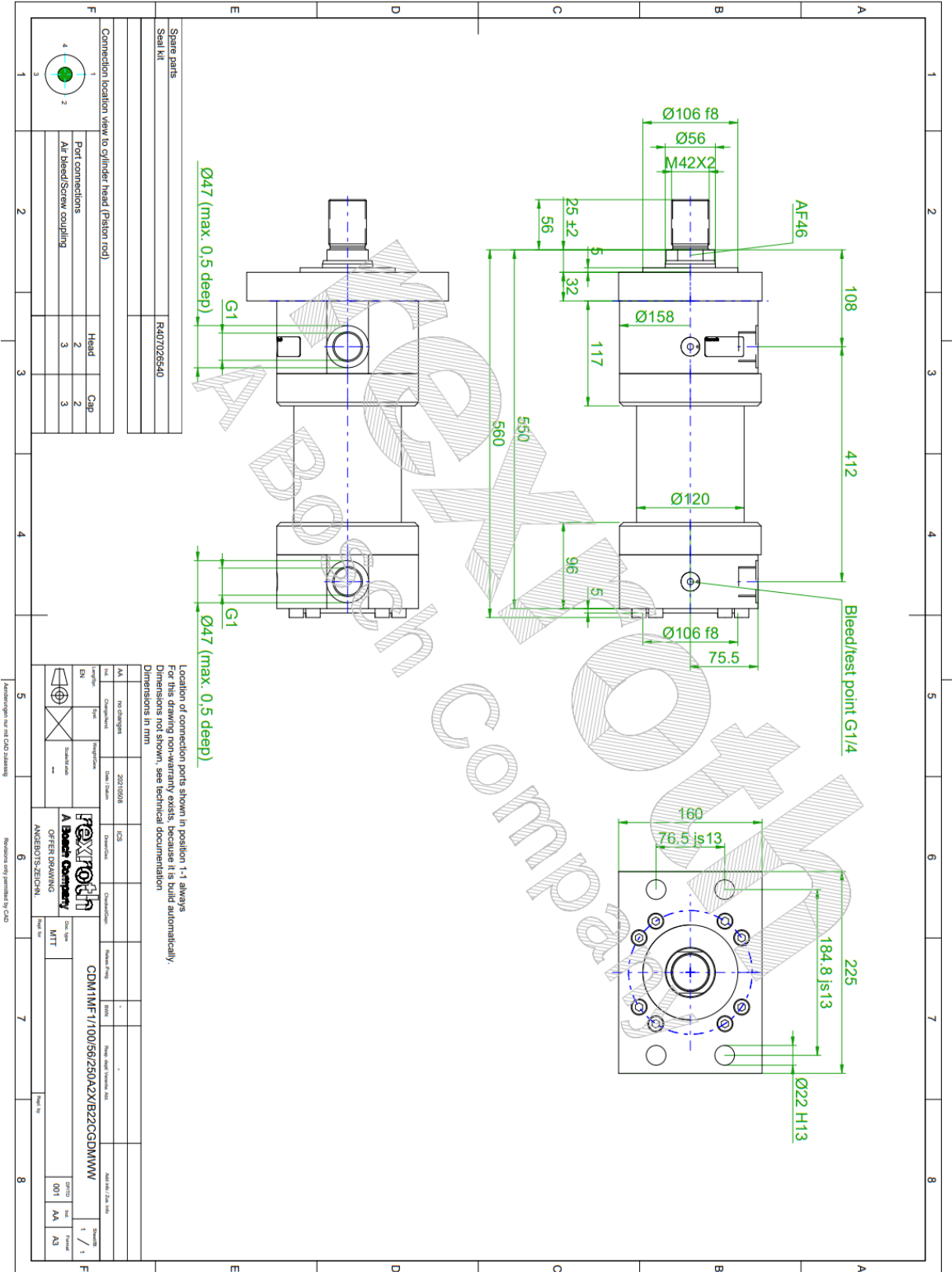
rexroth
A Bosch Company

Model code CDM1MF1/100/56/250A2X/B22CGDMWW



© This Document, as well as the data, specifications and other information set forth in it, are the exclusive property of Bosch Rexroth AG. Without their consent it may not be reproduced or given to third parties.

© Alle Rechte bei Bosch Rexroth AG, auch für den Fall von Schutzrechtsverletzungen. Jede Verwendungsbezugnis, wie Kopier- und Weitergaberecht, bei uns.



Kuulaholkki R1065

Linear sets, R1065 Closed

Linear sets, R1066 Adjustable

Design

- Precision housing (cast iron/steel)
- Standard linear bushing with wiper seals
- Two retaining rings



| Shaft | Material number | Weight |
|----------|--|--------|
| Ø d (mm) | With two wiper seals LSG-M- ... -DD | (kg) |
| 8 | R1065 208 00 | 0.09 |
| 12 | R1065 212 00 | 0.16 |
| 16 | R1065 216 00 | 0.27 |
| 20 | R1065 220 00 | 0.45 |
| 25 | R1065 225 00 | 0.89 |
| 30 | R1065 230 00 | 1.33 |
| 40 | R1065 240 00 | 2.51 |
| 50 | R1065 250 00 | 3.68 |
| 60 | R1065 260 00 | 6.73 |
| 80 | R1065 280 00 | 15.32 |

R1065 1 ... 00 for high temperatures (standard linear bushing without wiper seals)



| Shaft | Material number | Weight |
|----------|---|--------|
| Ø d (mm) | With two wiper seals LSGE-M- ... -DD | (kg) |
| 8 | R1066 208 00 | 0.09 |
| 12 | R1066 212 00 | 0.16 |
| 16 | R1066 216 00 | 0.27 |
| 20 | R1066 220 00 | 0.45 |
| 25 | R1066 225 00 | 0.89 |
| 30 | R1066 230 00 | 1.33 |
| 40 | R1066 240 00 | 2.51 |
| 50 | R1066 250 00 | 3.68 |
| 60 | R1066 260 00 | 6.73 |
| 80 | R1066 280 00 | 15.32 |

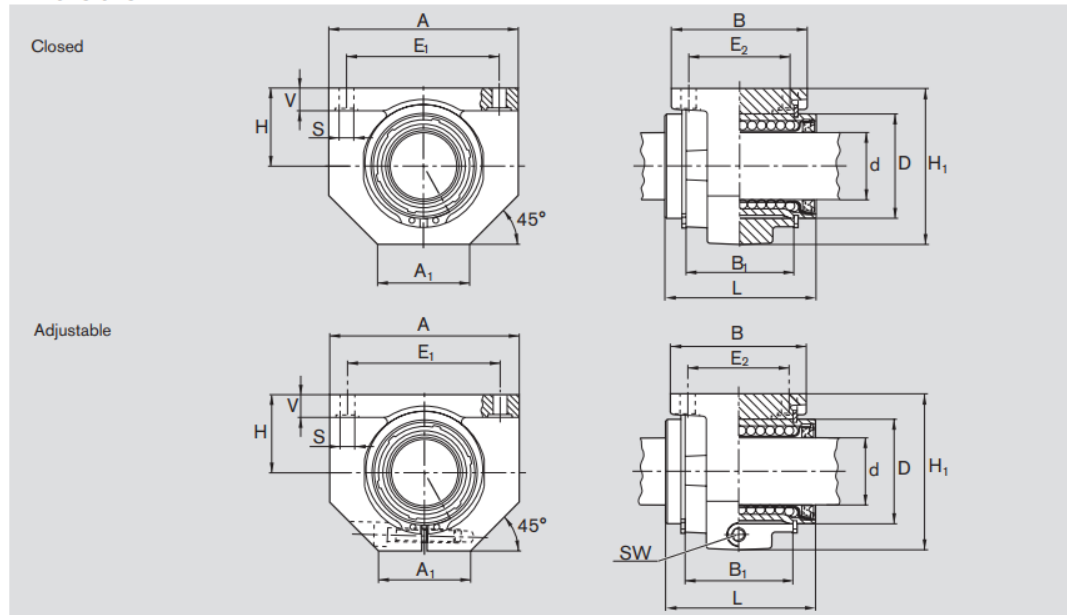
The dynamic load ratings are based on a total travel of 100,000 m.
When based on 50,000 m, the C values in the table are multiplied by 1.26.

Explanation of sample short product name

| LS | G | E | M | 20 | DD |
|------------|-----------|------------|-------------------------|------|----------------|
| Linear set | Cast iron | Adjustable | Standard linear bushing | Ø 20 | With two seals |

See page 96 for more information on short product names.

Dimensions



| Dimensions (mm) | | | | | | | | | | | | | | | Radial clearance ²⁾ (μm) | | Tolerance for dimension H ³⁾ (μm) | Load ratings ⁴⁾ (N) | |
|-----------------|-----|----|------------------------------|-----|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------|-----------------|------|-------------------|--|-----------|---|-----------------------------------|--|
| $\varnothing d$ | D | H | H ₁ ¹⁾ | L | A ¹⁾ | A ₁ ¹⁾ | B ¹⁾ | B ₁ | E ₁ | E ₂ | S | V ¹⁾ | SW | R1065 h6 shaft | R1066 | dyn. C | | stat. C ₀ | |
| 8 | 16 | 15 | 28 | 25 | 32 | 16 | 28 | 14 | 25 ± 0.15 | 20 ± 0.15 | 3.4 | 5.0 | 2.0 | +18 +5 | Comes clamped to h5 shaft (lower limit) and set to zero tolerance | +6 -17 | 320 | 240 | |
| 12 | 22 | 18 | 35 | 32 | 42 | 21 | 32 | 20 | 32 ± 0.15 | 23 ± 0.15 | 4.5 | 5.5 | 2.5 | +20 +5 | | +6 -17 | 420 | 280 | |
| 16 | 26 | 22 | 42 | 36 | 50 | 26 | 35 | 22 | 40 ± 0.15 | 26 ± 0.15 | 4.5 | 6.5 | 3.0 | +22 +5 | | +5 -18 | 580 | 440 | |
| 20 | 32 | 25 | 50 | 45 | 60 | 28 | 42 | 28 | 45 ± 0.15 | 32 ± 0.15 | 4.5 | 8.0 | 3.0 | +23 +6 | | +5 -19 | 1,170 | 860 | |
| 25 | 40 | 30 | 60 | 58 | 74 | 38 | 54 | 40 | 60 ± 0.15 | 40 ± 0.15 | 5.5 | 9.0 | 5.0 | +25 +6 | | +5 -19 | 2,080 | 1,560 | |
| 30 | 47 | 35 | 70 | 68 | 84 | 41 | 60 | 48 | 68 ± 0.20 | 45 ± 0.20 | 6.6 | 10.0 | 5.0 | +25 +6 | | +5 -19 | 2,820 | 2,230 | |
| 40 | 62 | 45 | 90 | 80 | 108 | 51 | 78 | 56 | 86 ± 0.20 | 58 ± 0.20 | 9.0 | 12.0 | 6.0 | +30 +7 | | +4 -21 | 5,170 | 3,810 | |
| 50 | 75 | 50 | 105 | 100 | 130 | 57 | 70 | 72 | 108 ± 0.20 | 50 ± 0.20 | 9.0 | 14.0 | 8.0 | +30 +7 | | +8 -25 | 8,260 | 6,470 | |
| 60 | 90 | 60 | 125 | 125 | 160 | 70 | 92 | 95 | 132 ± 0.25 | 65 ± 0.25 | 11.0 | 15.0 | 10.0 | +33 +7 | | +8 -26 | 11,500 | 9,160 | |
| 80 | 120 | 80 | 170 | 165 | 200 | 85 | 122 | 125 | 170 ± 0.50 | 90 ± 0.50 | 13.5 | 22.0 | 14.0 | +37 +8 | | +7 -28 | 21,000 | 16,300 | |

- 1) ISO 8062-3 - DCTG 9 tolerance.
- 2) Determined from working bore diameter and shaft tolerance statistics. When factoring in the outer diameter of the linear bushings and the housing bore, an h6 shaft produces similar radial clearance values as specified in the "H6H7" column under "Radial clearance" for the R0610 standard linear bushing.
- 3) Clamped (fastened) in relation to $\varnothing d$.
- 4) The load ratings indicated are minimal values as the orientation and direction of load cannot always be clearly defined.



Ruuviliitoksien laskut

Leikkauskestävyys

| Polkittaisangan ruuviliitos | Mittauspöytä ruuviliitos $F_{v,Ed} / N$ | Ruuvien määrä n | Valettuihin ruuviin leikkauskestävyys $F_{v,Rd}$ | Ruuvien vetomerkittävät $F_{t,R} / N/mm^2$ | Ruuvien läpimittaus d ja ruuvien halkaisijat r | VMG | Leikkaus m | Ruuvien jäsenhyökköiden a_b d_0 d_1 d_2 d_3 d_4 / mm | Terästä ja poraustarvikkeiden |
|------------------------------|---|-------------------|--|--|--|------|--------------|--|-------------------------------|
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | 13700 | 4 | 31425,00 | 800/00 | 0,60 | 1,25 | 2 | M10 | |
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | 62800 | 2 | 31425,00 | 800/00 | 0,60 | 1,25 | 1 | M12 | |
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | 42900 | 4 | 31425,00 | 800/00 | 0,60 | 1,25 | 1 | M12 | |
| Leikkimäinen ruuviliitos | 13700 | 4 | 31425,00 | 800/00 | 0,60 | 1,25 | 1 | M10 | |

Huom! Kestävyys laskettu 2 ruuvia perustetta

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{a_{v,R} \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

Ruunaupistuksetävyys

| Polkittaisangan ruuviliitos | k_1 | k_2 | Perustalehkeen merkittävät $f_{t,R} / N/mm^2$ | Ruuvien vetomerkittävät $f_{t,R} / N/mm^2$ | Ruuvien halkimittaus d / mm | VMG | Leikkaus m | Leikkimittaus a_b / mm | Terästä ja poraustarvikkeiden |
|------------------------------|----------|----------|---|--|-------------------------------|------|--------------|--------------------------|-------------------------------|
| Polkittaisangan ruuviliitos | 2,448148 | 0,866138 | 510 | 800 | 12 | 1,25 | 1 | 916,50 | |
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | 2,5 | 0,866138 | 510 | 800 | 12 | 1,25 | 1 | 816,50 | |
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | 2,033333 | 0,866138 | 510 | 800 | 12 | 1,25 | 1 | 816,50 | |
| Leikkimäinen ruuviliitos | 1,929633 | 1 | 510 | 800 | 12 | 1,25 | 1 | 816,50 | |

$$V_{Ed,Ed} = f_{t,R} \cdot A_{s,c} + \frac{1}{\gamma_{M2}} \cdot f_{t,R} \cdot A_{s,c}$$

Palamurtuminen

| Polkittaisangan ruuviliitos | Perustalehkeen merkittävät $f_{t,R} / N/mm^2$ | V_{Ed} | Perustalehkeen merkittävät $f_{t,R} / N/mm^2$ | Ruuvien vetomerkittävät $f_{t,R} / N/mm^2$ | Veden saattama pintala $A_{s,c}$ | Leikkimittaus a_b / mm | $V_{Ed,Ed} / N$ |
|------------------------------|---|----------|---|--|----------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Polkittaisangan ruuviliitos | 510 | 1,25 | 510 | 800 | 1000 | 2800 | 916,50 |
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | 510 | 1,25 | 510 | 800 | 288 | 1360 | 816,50 |
| Leikkimäinen ruuviliitos | 510 | 1,25 | 510 | 800 | 290 | 250 | 183,24 |

Nimellinen jäsenhyökköiden a_b / mm

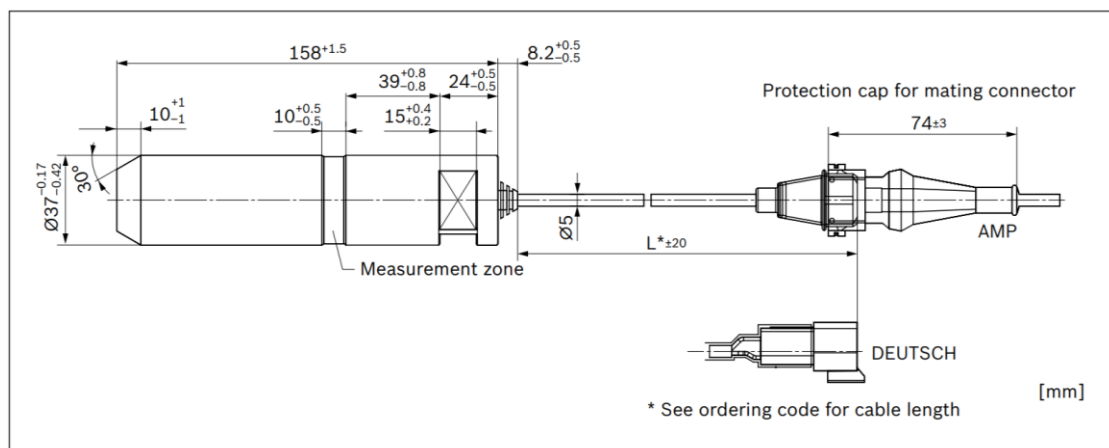
| Palkin | a_b | f_u | f_{ub} | $a_{v,R}$ | e_1 / mm | e_2 / mm | d_0 / mm | k_1 | a_b |
|------------------------------|-------|-------|----------|-----------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Polkittaisangan ruuviliitos | M4,5 | 510 | 800 | 0,444444 | 18 | 20 | 13,5 | 2,448148 | 0,444444 |
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | M6 | 510 | 800 | 0,606061 | 20 | 20 | 11 | 2,5 | 0,606061 |
| Teräsin lukkosen ruuviliitos | M6 | 510 | 800 | 0,864138 | 35 | 18 | 13,5 | 2,033333 | 0,864138 |
| Kaistattujen ruuviliitos | M10 | 510 | 800 | 1,234568 | 50 | 17,5 | 13,5 | 1,929633 | 1 |

Voima-anturi KMB 090

Technical data

| Type | | 025 | 040 | 050 | 060 | 090 | 110 | 150 |
|--|---|--|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Load range | F | ±25 kN | ±40 kN | ±50 kN | ±60 kN | ±90 kN | ±110 kN | ±150 kN |
| Overload range: standard | | ±80 kN | ±80 kN | ±80 kN | ±160 kN | ±160 kN | ±160 kN | ±220 kN |
| Electrically measurable overload | | +1.2 F _{pressure} ... -1.5 F _{tensile} | | | | | | |
| Supply voltage | U _{sup} | 8 V... 10 V controlled voltage (no direct supply from the vehicle electrical system (battery) or 5±0.5 V) | | | | | | |
| Supply current | I _{sup} | 5±0.5 V: inrush current = 1A; operating current = 20 mA (pulsed between -20 and 40 mA) 8 V ...10 V: inrush current = 3A; operating current = 40 mA (pulsed between -40 and 90 mA) | | | | | | |
| Signal voltage | U _{sig} | 25% ... 75% U _{sup} at 8 V ... 10 V; 15% ... 85% U _{sup} at 5±0.5 V | | | | | | |
| Load resistance | | ≥ 10 kΩ (≥ 50 kΩ, if used in safety-related applications, where GND wire break shall be detected) | | | | | | |
| Characteristic curve | | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Hysteresis | | See offer drawings | | | | | | |
| Operating temperature range | | -35 °C ... +85 °C | | | | | | |
| Maximum temperature for drying process for painting: | | +130 °C at max. 2 hrs | | | | | | |
| Type of protection with installed mating connector | AMP DEUTSCH | IP67 and IP69K IP66K | | | | | | |
| Vibrational load | | 24 g | | | | | | |
| Mating connector | | 3-pin connector with single-wire seal | | | | | | |
| Electromagnetic compatibility | ISO 11452-5 2002-04; 1 MHz ... 2 GHz | 150 V/m ≤ ±0.5% U _{sup} | | | | | | |
| CE | | ISO 14982:2009 | | | | | | |
| Storage time | | 5 years at an average relative humidity of 60 % and a temperature between -10 °C and +30 °C. For short periods of up to 100 hours a storage temperature of -20 °C to +40 °C is permissible | | | | | | |

Dimensions



Installation instructions

