



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PETRI SAARI
TRAKTORIN TUOTESUUNNITTELUN VALIDOINTI
Diplomityö

Tarkastajat: dosentti Juha Miettinen
ja professori Pentti Saarenrinne
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 5. marraskuuta
2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

SAARI, PETRI: Traktorin tuotesuunnittelun validointi

Diplomityö, 87 sivua, 3 liitesivua

Elokuu 2015

Pääaine: Konejärjestelmien suunnittelu

Tarkastajat: dosentti Juha Miettinen ja professori Pentti Saarenrinne

Avainsanat: Design for Six Sigma, simulointi, tuotekehitys, tuotesuunnittelu, validointi

Kehitettävälle tuotteelle asetetaan yleensä useita vaatimuksia, joiden tärkeimpiä lähteitä ovat käyttäjät eli asiakkaat, kilpailijat, yrityksen johdon määrittelemät strategiat sekä organisaation sisäiset tarpeet. Eri lähteistä tulevat vaatimukset ja toiveet analysoidaan, jonka tuloksena muodostuu tuotteen konsepti ja tuotespesifikaatio. Tämän työn tavoitteena on kuvata Valtran nykyisen validointikäytännön ja kirjallisuuden pohjalta järjestelmällinen validointiprosessi traktorin tuotesuunnittelua varten sekä arvioida, että miten kestoikälaskentaa ja simulointimenetelmiä voitaisiin hyödyntää entistä tehokkaammin validointiprosessissa.

Työ jakautuu kahteen osaan: Kirjallisuustutkimusosassa suunnittelun validointiprosessia tarkastellaan Design for Six-Sigma – filosofian pohjalta luotujen työkalujen näkökulmasta ja muodostetaan liityntäpinnat filosofian ja käytännön toiminnan välille. Toisessa osiossa käydään läpi tutkimuksessa kuvattu tuotesuunnittelun validointiprosessi esimerkkitapauksen avulla, jossa aihetta tarkastellaan komponenttitasolla. Esimerkin komponentti on etukuormaimen runkosovite ja sille luodaan validointisuunnitelma vaatimuslistan avulla. Validointisuunnitelmaan kirjatut tarvittavat lisätiedot rakenne- ja kestoikälaskentaa sekä monikappalesimulointia varten hankitaan laboratorio- ja kenttätestauksessa suoritettavien venymä-, paine- ja kiihtyvyyssmittauksien avulla.

Tutkimus osoittaa, että riittävän tarkkuuden omaavan tuotespesifikaation pohjalta luotu systeemitason vaatimuslista sekä siitä johdettu komponenttitason vaatimuslista helpottaa huomattavasti validointisuunnitelman tekemistä ja luo pohjan systemaattiselle validointiprosessille. Tuotemallin analysointityökalujen tehokkaampi hyödyntäminen on mahdollista, jos ne otetaan huomioon jo validointisuunnitelman yhteydessä. Tuotemallin analysointityökalujen, kuten kestoikälaskennan ja monikappalesimuloinnin, avulla on mahdollista korvata fyysisellä prototyypillä tehtäviä validointitestejä ja pienentää näin validointikustannuksia. Jotta tuotemallin analysointityökaluja voitaisiin pitää riittävän luotettavina, ne tulee vastaavasti verifioida fyysisten testien avulla. Tarkoistakin simulointimalleista huolimatta fyysisiä testejä tarvitaan kuitenkin aina, jotta voidaan olla varmoja tuotteen toiminnasta todellisissa käyttöolosuhteissa sillä kaikkia asioita ei voida ennakoita tai simuloida.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Machine Technology

SAARI, PETRI: Product Design Validation of Tractor

Master of Science Thesis, 87 pages, 3 Appendix pages

August 2015

Major: Machine System Engineering

Examiner: docent Juha Miettinen and professor Pentti Saarenrinne

Keywords: Design for Six Sigma, simulation, product development, product design, validation

A new products or services is usually developed to meet many kind of requirements. Most important sources of requirements are customers, competitors, a company strategy and the internal organization of the company. All requirements and expectations will be analysed and a product or a service concept will be created based on that information. The purpose of this study is to create a systematic validation process for a product design of a tractor, which is based on Valtra's current validation practices and available literature. It should also answer the question: "How to get more advantage with design analysis tools such as fatigue life prediction and simulation tools in validation process".

The thesis is divided into two parts. In the literature study part, design validation process is examined with tools, which are derived from Design for Six Sigma approach. Hence, a product design validation of tractor is created based on the literature study. In the second part, the phases of the created validation process is performed in a real world case example. The case example is considered in component level and the examined component is a sub frame of a front loader. Required additional information, which is mentioned in a design validation plan of sub frame, is collected by strain, pressure and acceleration measurements in laboratory and field tests.

The study indicates that product specification of a concept, with high technical detail level, allows to form a high quality system level design requirements list. Hence, a subsystem and component level design requirements lists are able to derive from the system level design requirements list. The high quality design requirement list makes a design validation plan much easier and provides good basis for a systematic validation process. Taking the design analysis tools account in first stage of design validation planning, makes usage of design analysis tools more effective in validation process. With design analysis tools, such as fatigue life prediction, multibody simulation and system simulation, it is possible to reduce testing hours with physical prototypes and the validation costs. The design analysis tools, which are used for virtual testing, should always be verified by physical testing to ensuring the reliability. Despite of a precise simulation models, physical validation testing is always needed to be sure of the product's functioning under actual operating conditions. This is because, it is not possible to predict or simulate all of the real world phenomenons.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Valtra Oy:n tuotekehitysosastolla Suolahdessa.

Kiitän työni tarkastajia Juha Miettistä ja Pentti Saarenrinnettä asiantuntevasta opastuksesta ja rakentavasta palautteesta.

Kiitokset Seppo Anttilalle mahdollisuudesta diplomityön suorittamiseen sekä Petri Hannukaiselle asiantuntevasta ohjauksesta laajan aihealueen käsittelyssä. Kiitokset Antti Kalliokoskelle opastuksesta ja neuvoista simulointiin ja datankäsittelyyn liittyvissä kysymyksissä ja Hannu Pelkoselle FEA-laskentamallin kehityksestä sekä muille tuotekehityksen asiantuntijoille, jotka ovat osaltaan vaikuttaneet työni onnistumiseen. Kiitokset myös Markku Strömille venymämittauksiin liittyvistä tukipalveluista.

Lisäksi haluan kiittää vaimoani, vanhempiani sekä muita lähipiiriin kuuluvia henkilöitä tuesta ja kannustuksesta, jota olen saanut koko opiskeluprosessin ajan.

27.5.2015

Petri Saari

SISÄLLYS

| | |
|--|-----|
| Tiivistelmä | ii |
| Abstract | iii |
| Alkusanat | iv |
| Termit ja niiden määritelmät | vi |
| 1 Johdanto | 1 |
| 2 Laatu..... | 2 |
| 3 Six Sigma ja Lean | 6 |
| 4 Design for Six Sigma | 14 |
| 4.1 Lean tuotekehitysprosessi | 15 |
| 4.2 Design for Six Sigman vaiheet..... | 16 |
| 4.2.1 Vaihe I: Vaatimusten tunnistaminen..... | 16 |
| 4.2.2 Vaihe C: Suunnitelman karakterisointi..... | 17 |
| 4.2.3 Vaihe O: Suunnitelman optimointi..... | 18 |
| 4.2.4 Vaihe V: Suunnitelman validointi | 18 |
| 5 Suunnittelun validointi | 20 |
| 6 Tuotesuunnittelun validointi | 21 |
| 7 Validoinnin työkalut ja niiden verifiointi..... | 23 |
| 7.1 Suunnitteluvaatimusten analysointi | 23 |
| 7.2 Tuotemallin analysointi..... | 27 |
| 7.2.1 Suunnittelukatselmukset ja tarkastelumenetelmät | 27 |
| 7.2.2 Matemaattiset mallit | 27 |
| 7.2.3 Tietokoneavusteinen virtuaalitestaus ja simulointi..... | 28 |
| 7.3 Validointitestaus..... | 29 |
| 8 Traktorin tuotesuunnittelun validointiprosessi..... | 32 |
| 9 Esimerkkitapaus: Runkosovitteen tuotesuunnittelun validointi..... | 34 |
| 9.1 Runkosovitteen suunnitteluvaatimukset..... | 35 |
| 9.2 Validointisuunnitelma | 36 |
| 9.3 Runkosovitteen tuotemallin analysointi ja validointitestaus..... | 38 |
| 9.3.1 Laboratoriotestaus..... | 39 |
| 9.3.2 Kenttätestaus | 44 |
| 9.3.3 Runkosovitteen kestoikälaskennan matemaattinen malli | 60 |
| 9.4 Tietämyskannan tietojen päivitys..... | 76 |
| 10 Johtopäätökset..... | 83 |
| 10.1 Tuotesuunnittelun validointiprosessi | 83 |
| 10.2 Esimerkkitapaus | 84 |
| 11 Jatkotoimenpiteet | 85 |
| Lähteet..... | 86 |
| Liite 1: Tuotesuunnittelun validointiprosessikaavio | 88 |
| Liite 2: Runkosovitteen vaatimuslista..... | 89 |
| Liite 3: Kuva runkosovitteesta | 90 |

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

| | |
|------------------|---|
| A | Amplitudisuhde |
| A_i | Kestoikäparametri, kun $i = 1,2$ |
| a_M | Materiaaliparametri |
| a_d | Vakio taulukosta 9.7 |
| a_R | Pinnankarheusvakio |
| b_M | Materiaaliparametri |
| C_D | Koon korjauskerroin |
| $C_{E,T}$ | Lämpötilankorjauskerroin |
| C_p | Suorituskykyindeksi |
| C_{pk} | Suorituskykyindeksi |
| C_R | Luotettavuuden korjauskerroin |
| C_S | Pintakäsittelykerroin |
| $C_{\sigma,E}$ | Normaalijännityksen väsymiskerroin |
| $C_{\sigma,R}$ | Pinnankarheuden korjauskerroin normaalijännitykselle |
| $Damage_i$ | Laskennallinen vaurio tietyllä jännitysamplitudilla ja sykli- määrällä |
| d_{eff} | Poikkileikkauksen tehollinen halkaisija |
| $d_{eff,min}$ | Vakio taulukosta 9.7 |
| D_{PM} | Vauriosumman kriittinen arvo Palmgren-Miner - vaurioi- tumishypoteesissa |
| $\Delta\sigma$ | Jännitysvaihteluväli |
| Δt | Jännityshistorian pituus sekunneissa |
| k | Kulmakerroin |
| $K_{b,f}$ | Loven vaikutuskerroin taivutuskuormitukselle |
| K_f | Loven vaikutuskerroin |
| M_σ | Keskijännityksen vaikutuskerroin |
| μ | Keskiarvo |
| N | S-N – kuvaajassa ilmoitettu syklimäärä |
| n_i | Jännitysjaksojen lukumäärä. Syklimäärä. |
| $N_{f,i}$ | Jännitysjakson mukainen kestoikä |
| O | Poikkileikkauksen pinta-ala |
| R | Rajajännityssuhde |
| R_Z | Keskimääräinen pinnankarheus |
| S_a | S-N – kuvaajassa ilmoitettu väsymislujuus syklimäärällä N |
| SSI | Maksimipääjännitys |
| $S_{S,bE}$ | Väsymisraja taivutuskuormituksen tapauksessa |
| $S_{S,\sigma,E}$ | Väsymisraja sileälle kiillotetulle komponentille |
| $S_{\sigma,a}$ | Jännitysamplitudi |
| $S_{\sigma,ar}$ | Ekvivalentti jännitysamplitudi |
| $S_{\sigma,m}$ | Keskijännitys |

| | |
|----------------|---|
| $S_{t,u}$ | Todellisen komponentin murtolujuus |
| $S_{t,u,min}$ | Minimimurtolujuus |
| $S_{t,u,std}$ | Standarditestin mukainen murtolujuus |
| σ | Keskihajonta |
| σ^2 | Varianssi |
| σ_I | Maksimipääjännitys |
| σ_{max} | Maksimijännitys |
| σ_{min} | Minimijännitys |
| σ_n | Normaalijännitys |
| V | Kappaleen tilavuus |
| z | Standardoidun normaalijakauman satunnaismuuttuja |
| AMPIP2.1 | Lyhenne sanoista AGCO Major Product Introduction Process. Numerot lopussa kertovat prosessin kehitysversion. |
| AQS-Playbook | AGCO:n laadunhallintatyökalu. AGCO quality system playbook. |
| CAD | Tietokoneavusteinen suunnittelu. Computer-aided design. |
| CAE | Tietokoneavusteinen laskenta. Computer-aided engineering. |
| CFD | Kaasujen ja nesteiden virtauksen ja muiden ominaisuuksien laskentaan käytettävä FEA menetelmä. |
| CTC | Kustannusten kannalta kriittiset tekijät. Critical to Cost. |
| CTD | Toimituksen kannalta kriittiset tekijät. Critical to Delivery. |
| CTQ | Laadun kannalta kriittiset tekijät. Critical to Quality. |
| CTS | Tyytyväisyyden kannalta kriittiset tekijät. Critical to Satisfaction. |
| DFSS | Six Sigma innovointiprosessi. Design for Six Sigma. |
| DMAIC | Six Sigma ongelmanratkaisuprosessi. Lyhenne sanoista Define, Measure, Analyze, Improve ja Control. |
| DMADV | Six Sigma innovointiprosessin menetelmä. Lyhenne sanoista Define, Measure, Analyze, Design ja Verify. |
| DOE | Koesuunnittelu. Design of Experiments. |
| DPMO | Virheiden määrä miljoonassa mahdollisessa tapauksessa. Defects per Million Opportunities. |
| FEM | Elementtimenetelmä. Finite element method. |
| FEA | Tietokonepohjainen laskentatekniikka, jonka avulla voidaan ratkaista useita mekaanisia riippuvuussuhteita. Finite element analysis. |
| FMEA | Vika- ja vaikutusanalyysi. |
| HALT | Nopeutettu kestoikätestaus. Highly accelerated life testing. |
| HCF | Alue kestoikälaskennassa, jonka syklimäärä on tuhat sykliä tai enemmän (yleisesti käytetty alaraja). High cycle fatigue. |

| | |
|-------------|--|
| ICOV | Six Sigma innovointiprosessin menetelmä. Lyhenne sanoista Identify, Characterize, Optimize ja Verify. |
| LCF | Alue kestoikälaskennassa, jonka syklimäärä on enintään tuhat sykliä (yleisesti käytetty yläraja). Low cycle fatigue. |
| LSL | Spesifikaation alaraja. Lower Specification Limit. |
| MBS | Monikappalesimulointi. Multibody simulation. |
| Poka-yoke | Virheenestomenetelmä. |
| PSD | Tehospektri. Power spectral density. |
| QFD | Quality Function Deployment. |
| RMS | Neliöllinen keskiarvo. Root mean square. |
| TIPS | Theory of inventive problem solving. |
| TRIZ | Systemaattinen innovointi- ja ongelmanratkaisumenetelmä. Teoriya resheniya izobreatatelskikh zadatch. (katso TIPS) |
| USL | Spesifikaation yläraja. Upper Specification Limit. |
| Validointi | Validointi on prosessi, jonka avulla varmistetaan, että prosessin kohde täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset. Kohde voi olla tuote, palvelu tai prosessi esimerkiksi traktori, tietokoneohjelma tai valmistusprosessi. Validointi vastaa kysymykseen: Onko valmistettu tuote spesifikaation mukainen? |
| Verifiointi | Verifiointi on prosessi, jonka avulla varmennetaan, että prosessin tuotos on määritelmän mukainen. Verifiointi vastaa kysymykseen: Onko tuote valmistettu oikein? |
| VOC | Asiakkaan tarpeet. Voice of the Customer. |

1 JOHDANTO

Monella toimialalla on huomattu, että markkinat ovat jatkuvassa muutostilassa ja muutoksiin on pyrittävä reagoimaan mahdollisimman ajoissa, jotta oma markkinaosuus voitaisiin säilyttää vähintään nykyisellä tasolla. Asiakastyytyväisyyteen vaikuttaa suuresti se, että millaisen vastineen asiakas tuntee saavansa rahoilleen. Tekninen huipputuote ei välttämättä takaa hyvää asiakastyytyväisyyttä, jos esimerkiksi hinta on huomattavan korkea tai tuote on herkkä vikaantumiselle. Yritysten johdon määrittelemät liiketoimintastrategiat ovat usein saaneet vaikutteita Six Sigma filosofiasta, jonka menetelmien avulla pyritään mahdollisimman korkeaan asiakastyytyväisyyteen. Six Sigman menetelmiä hyödynnetään useilla eri liiketoiminta-alueilla ja myös tuotteiden kehittämiseen on kehitetty prosesseja, joiden tavoitteena on Six Sigman toteuttaminen käytännön tasolla. Design for Six Sigma (DFSS) tarkoittaa ryhmää menetelmiä, jotka on kehitetty erityisesti tuotteiden kehittämiseen siten, että niitä voidaan tuottaa sujuvasti ja erittäin korkealla laatutasolla.

Suunnitteluprosessille on hyvä tehdä aika ajoin kriittinen tarkastelu, jossa perehdytään nykyisiin suunnittelu- ja testauskäytäntöihin sekä peilataan niitä viimeisimpiin havaintoihin ja mittaustietoihin sekä tarjolla oleviin testausmenetelmiin. Tämän työn tavoitteena on kuvata Valtran nykyisen validointikäytännön ja kirjallisuuden pohjalta järjestelmällinen validointiprosessi traktorin tuotesuunnittelua varten sekä arvioida, että miten kestoikälaskentaa ja simulointimenetelmiä voitaisiin hyödyntää entistä tehokkaammin validointiprosessissa.

Tämän tutkimuksen alussa perehdytään AGCO:n kehittämään AMPIP2.1-tuotekehitysprosessiin, jota Valtralla käytetään sekä Design for Six Sigma filosofiaan ja sen käsitteisiin sekä tuotteen kehittämiseen liittyviin työkaluihin. Seuraavaksi Design for Six Sigman vaiheisiin kuuluva tuotesuunnittelun validointi kuvataan Yangin (2009) esittämän teorian pohjalta. Tämän jälkeen luodaan prosessikaavio traktorin tuotesuunnittelun validoinnille ja käydään läpi prosessikaaviossa esitetyt vaiheet.

Seuraavaksi käydään läpi tutkimuksessa kuvattu traktorin tuotesuunnittelun validointiprosessi esimerkkitapauksen avulla, jossa aihetta tarkastellaan komponenttitasolla. Esimerkin komponentille luodaan ensin validointisuunnitelma vaatimuslistan pohjalta, minkä jälkeen validointisuunnitelmaan kirjatut tarvittavat lisätiedot rakenne- ja kestoikälaskentaa sekä monikappalesimulointia varten hankitaan laboratorio- ja kenttätestauksessa suoritettavien venymä-, paine- ja kiihtyvyyssmittauksien avulla. Viimeisessä vaiheessa kartoitetaan tietämuskannassa olevien tietojen päivitystarpeet niiden tietojen osalta, joita validoinnissa on käytetty sekä esitetään johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet.

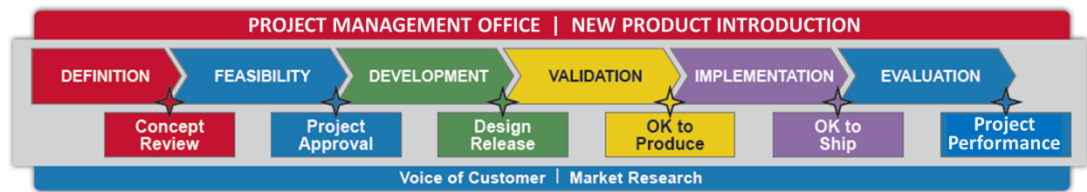
2 LAATU

Kannattavuus on yksi tärkeimmistä tekijöistä mille tahansa liikeyritykselle. Korkea kannattavuus syntyy vahvasta myynnistä ja alhaisista kokonaiskustannuksista yrityksen kaikissa toiminnoissa. Terveellä pohjalla oleva myynti pohjautuu suurelta osin korkeaan laatuun ja kohtuulliseen hintaan. Six Sigma on yrityksen huippuosaamiseen tähtäävän toiminnan alkulähde, joka parantaa tehokkaasti laatua ja vähentää kustannuksia ja se onkin saanut paljon huomiota yritysmaailmassa viimeaikoina. Sana *laatu* ymmärretään usein terminä, joka merkitsee erinomaista tuotetta tai palvelua, joka täyttää tai ylittää asiakkaan odotukset. Odotukset perustuvat tuotteen tai palvelun käyttötarkoitukseen ja myyntihintaan. (Yang 2009).

Valtra Oy:n juuret ovat Valmet Oy:n vuonna 1951 aloittamassa Valmet-merkkisten traktorien tuotannon aloituksessa. Valmet Oy:n pirstouduttua osiin traktoriliiketoiminta siirtyi yritysjärjestelyjen kautta Sisu-konserniin vuonna 1994. Nykyään Valtra-nimisiä traktoreita valmistava Valtra Oy Ab on osa vuonna 1990 perustettua globaalia AGCO konsernia, joka on maailman kolmanneksi suurin maatalouskoneiden suunnittelija, valmistaja ja myyjä. AGCO:n avaintuotemerkkeihin kuuluu Valtran lisäksi saksalainen Fendt, ranskalainen Massey Ferguson ja amerikkalaiset (USA) Challenger ja GSI. AGCO:n tuotevalikoimaan kuuluu traktoreita, puimureita, heinäkoneita, ruiskuja, rehu-koneita, maanmuokkauskoneita, työkoneita ja viljanvarastointi- ja proteiinintuotantojärjestelmiä. AGCO:n pääkonttori sijaitsee Duluthissa USA:n Georgian osavaltiossa. (Valtra 2014)

AGCO pyrkii yhtenäistämään tytäryhtiöidensä toimintaa ja toimintatapoja ja AGCO:n globaali laatuorganisaatio onkin laatinut toimintaohjeita ja työkaluja laadunhallintaa varten. Yksi keskeisistä laadunhallintatyökaluista on AQS-Playbook (AGCO Quality System Playbook), joka asettaa laatuvaatimuksille globaalin standardin ja jota sovelletaan maailmanlaajuisesti AGCO:n tuotantolaitoksissa ja yhtiöiden toiminnoissa. AQS-Playbook määrittää NPI-projektissa (New Product Introduction Project) käytettävät ydin laatutyökalut ja menetelmät, joita käytetään tuotteen suunnitteluprosessin aikana. NPI-projektit viedään läpi AGCO:n kehittämän vaihe-portti – prosessin eli AMPIP2.1-prosessin mukaisesti, jota käytetään ohjaamaan ja seuraamaan projektiresurssien käyttöastetta ja tehtävien ja suoritteiden valmistumista ajallaan sekä toiminnallisten tavoitteiden seurantaan ja riskien hallintaan AMPIP2.1 on lyhenne sanoista AGCO Major Product Introduction Process ja numerot lopussa kertovat prosessin kehitysversion. AMPIP2.1-prosessista on kehitetty neljä eri variaatiota erityyppisiä kehitysprojekteja varten. AMPIP2.1-prosessin runko muodostuu kuusivaiheisesta AMPIP2.1 6-Phases – prosessista, jota käytetään koko traktorin käsittävässä kehitysprosessissa ja jonka pohjalta

muut variaatiot on muodostettu. Kuvassa 2.1 on esitetty täysi kuusivaiheinen tuotekehitysprosessikaavio (AGCO 2014).



Kuva 2.1. Kuusivaiheinen AMPIP2.1 6-Phases – prosessi (AGCO 2014).

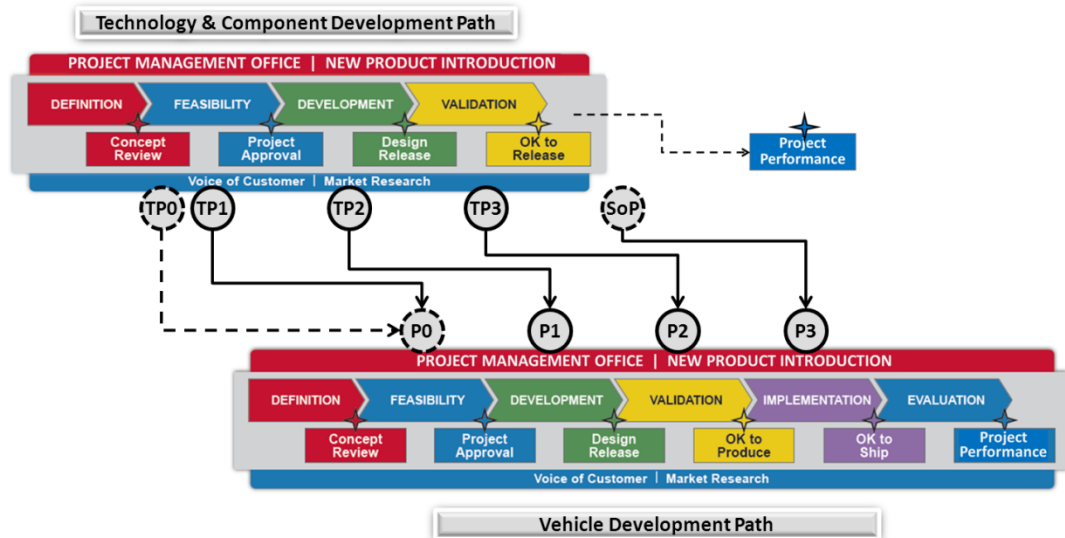
Muut variaatiot ovat AMPIP2.1 Lean, AMPIP2.1 3rd. Party ja kuvan 2.2 mukainen karstuttu nelivaiheinen AMPIP2.1 4-Phases TD – prosessi, jota käytetään teknologia- ja komponenttikehityksen prosessina (AGCO 2014).



Kuva 2.2. Nelivaiheinen AMPIP2.1 4-Phases – prosessi (AGCO 2014).

AMPIP2.1-prosessi käsittää kaikki tuotekehitysprosessin osa-alueet mukaan luettuna konseptoinnin, suunnittelun, valmistuksen, hankinnan, markkinoinnin, jälkimarkkinoinnin, koulutuksen, ja projektin onnistumisen arvioinnin. AMPIP2.1-prosessissa *validointi* on esitetty omana vaiheenaan DR-portin (Design Release) jälkeen, mutta *suunnittelun validointi* on itse asiassa aliprosessi, joka alkaa jo *määrittely*-vaiheesta (Definition) ja jatkuu aina OS-porttiin (OK to Ship) saakka. Suunnittelun validointi – prosessi sisältää edelleen seuraavat rinnakkaiset prosessit: *tuotesuunnittelun validointi*, *valmistusprosessin validointi* ja *tuotannon validointi* (Yang 2009). Tässä tutkimuksessa asiaa tarkastellaan tuotesuunnittelun validoinnin näkökulmasta.

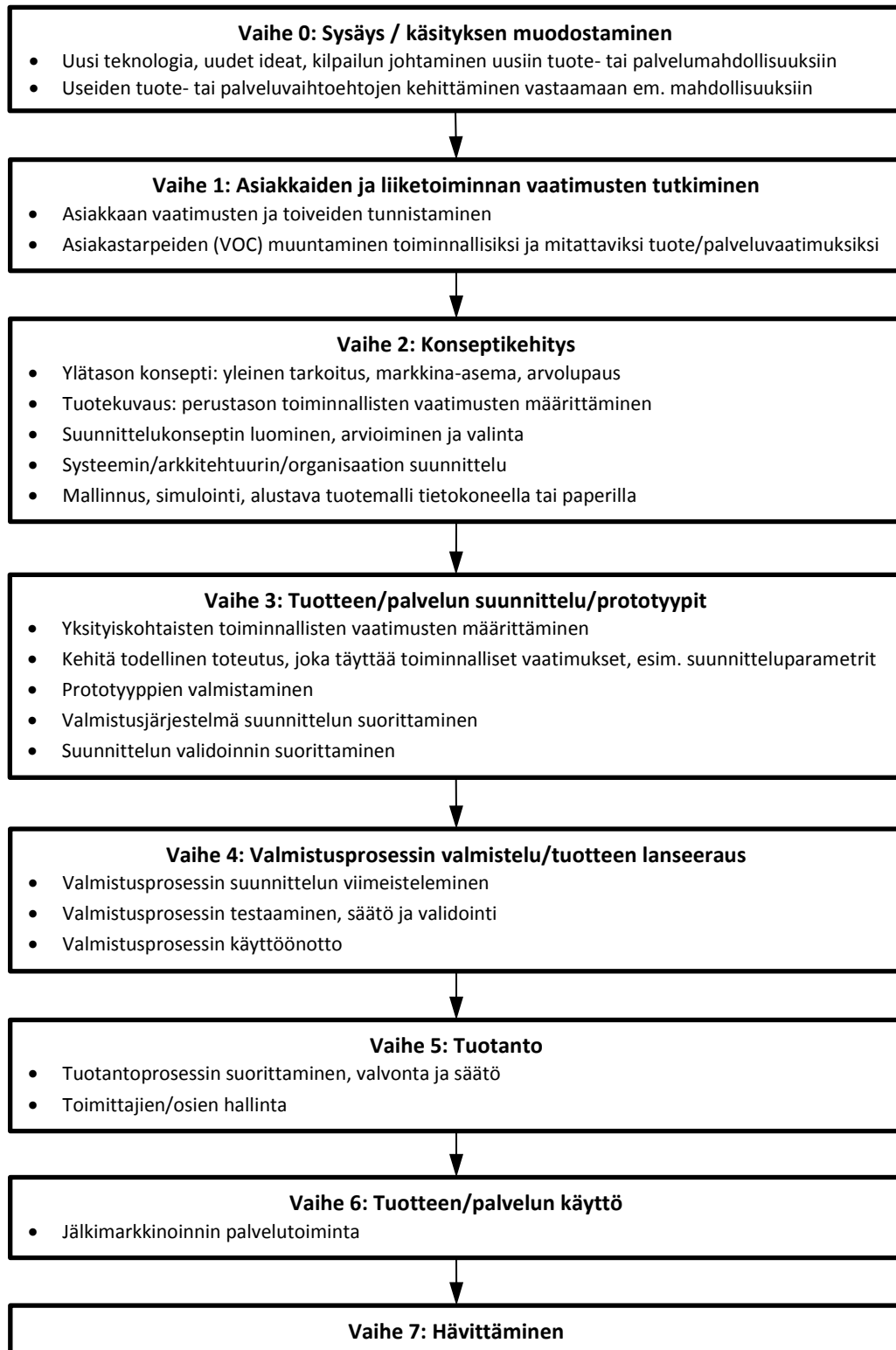
Kuvassa 2.3 on yleinen esimerkki siitä miten neli- ja kuusivaiheinen prosessi voivat kytkeytyä toisiinsa. Kuvassa 2.3 nelivaiheinen teknologia- tai komponenttikehitysprojekti kulkee yhden askeleen edellä kuusivaiheista koko tuotteen kehitysprojektiä. Myös prototyypit nimetään eri tavalla siten, että ”TP” on teknologia- tai komponenttiprototyyppi ja ”P” tarkoittaa koko tuotteen prototyyppiä.



Kuva 2.3. Neli- ja kuusivaiheisen AMPIP2.1-prosessin yhdistelmä (AGCO 2014).

AMPIP2.1-prosessissa on havaittavissa hyvin paljon yhteneväisyyksiä Lean tuotekehitysprosessin ja Design for Six Sigman (DFSS) sekä niiden työkalujen kanssa. Tuotteen elinkaari on usein pitkä ja monimutkainen prosessi ja laatu-käsite voi vaihdella suuresti elinkaaren eri vaiheissa. Yangin (2009) mukaan hyvä laadunvarmistusohjelma ottaa huomioon kaikki elinkaaren vaiheet. Kuvassa 2.4 on kaavio tuotteen/palvelun tyypillisestä elinkaaresta, jossa tuotekehitystoiminta tapahtuu vaiheissa 1-5 ja joista myös tuotekehityssykliksi muodostuu. (Yang 2009)

AMPIP2.1-prosessista löytyy vastaavat kohdat kuin Yangin (2009) kuvaamasta tuotteen/palvelun tyypillisestä elinkaaresta vaiheissa 1-5 kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Tyypillinen tuotteen/palvelun elinkaari. Tuotteen/palvelun kehityssykli tapahtuu vaiheissa 1-5. (Yang 2009)

3 SIX SIGMA JA LEAN

Six Sigma on menetelmä, joka tarjoaa yrityksille työkaluja liiketoiminnan prosessien parantamiseen. Six Sigmassa prosessi on perusyksikkö, johon parannukset kohdistuvat. Prosessi voi olla tuote tai palveluprosessi, jota yritys tuottaa ulkopuolisille asiakkaille tai se voi olla yrityksen sisäinen prosessi kuten laskutus- tai tuotantoprosessi. Six Sigmassa prosessin parantamisen tarkoitus on lisätä suorituskykyä ja vähentää suorituskykyvaihtelua, mikä johtaa virheiden määrän pienentymiseen ja parempaan kannattavuuteen sekä parempaan työntekijöiden moraaliin ja tuotteen laatuun. (Yang 2009)

Termillä Six Sigma on useita eri merkityksiä ja sitä voidaan pitää enemmän liiketoimintastrategiana kuin laatuohjelmana. Mitallisena määreenä Six sigma (6σ) on tilastollinen mittayksikkö prosessin suorituskyvyille. Tilastolaskijat käyttävät kreikkalaista kirjainta sigmaa (σ) kuvaamaan keskihajontaa, joka ilmoittaa näytearvojen ryhmittymisen kaikkien näytteiden arvojen keskiarvon ympärille. Mitä korkeampi sigma arvo on, niin sitä paremmin prosessi toimii. Jos sigmaa käytetään yleisenä määreenä koko prosessissa, niin on mahdollista verrata suhteellisia laatutasoja samanlaisten ja erilaisten tuotteiden, palveluiden ja prosessien välillä. Sigman asteikko on eksponentiaalinen, kun sitä käytetään kuvaamaan virheiden määrää suhteessa miljoonaan mahdollisuuteen. Toimimalla yhden sigman tasolla prosessi tuottaa enemmän virheellisiä kuin hyviä tuotoksia verrattuna niin sanottuun standardi hyvyyteen, jonka asiakkaat määrittelevät. Kuuden sigman taso tarkoittaa lähes täydellistä laaduntuottokykyä kyseisessä prosessissa. (Watson 2005)

Sigma suorituskykyasteikkoa voidaan käyttää myös prosessin kyvykkyyden mittaamiseen sekä laatuvirheiden aiheuttamien kustannusten estimoimiseen. Prosessin kyvykkyydelle käytetään yleensä suorituskykyindeksejä C_p ja C_{pk} .

Jos prosessin suorituskyky on normaalijakautunut, niin suuri osa sen tuotoksista jakautuu $\pm 3\sigma$:n alueelle prosessin tuotosten keskiarvoon nähden. Jos prosessin rajat on asetettu välille $[-3\sigma, +3\sigma]$, niin sen tuotokset ovat hajaantuneet lähes kokonaan 6σ :n alueelle. Tällaista kokonaishajontaa käytetään usein prosessivaihteluiden mittaamiseen. (Yang 2009)

Normaalijakauma on jatkuva todennäköisyysjakauma ja, jos satunnaismuuttuja X on normaalijakautunut, niin sen merkintä on kaavan 1 mukainen. (Zwillinger 2002)

$$X \sim N(\mu, \sigma^2), \quad \text{jossa} \quad (1)$$

parametri μ on keskiarvo ja $\sigma^2 > 0$ on jakauman varianssi ja sen neliöjuuri σ on keskihajonta. Standardoidun normaalijakauman eli standardinormalijakauman tapauksessa

odotusarvo eli keskiarvo saa arvon $\mu=0$ ja varianssi arvon $\sigma^2 = 1$, jolloin $X \sim N(0,1)$. Standardinormaalijakauman tapauksessa kertymäfunktio $\phi(X)$ on kaavan 2 mukainen. (Zwillinger 2002)

$$\phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)} dt = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{2}} \right) \right], z \in \mathbb{R}, \quad \text{jossa} \quad (2)$$

$\operatorname{erf}(z)$ on virhefunktio ja z standardoidun normaalijakauman satunnaismuuttuja, joka lasketaan kaavalla 3. (Zwillinger 2002)

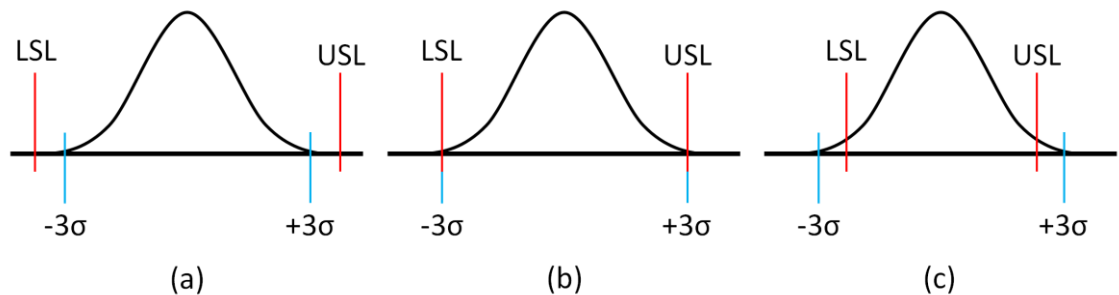
$$z = \frac{X - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \quad (3)$$

Todennäköisyys sille, että prosessin tuotokset jakaantuvat välille $[-3\sigma, +3\sigma]$ saadaan sijoittamalla kaavat 2 ja 3 kaavaan 4. (Zwillinger 2002)

$$\begin{aligned} P(-3\sigma \leq X \leq 3\sigma) &= P(X \leq 3\sigma) - P(X \leq -3\sigma) \\ &= \phi(3\sigma) - \phi(-3\sigma) \times 100\% = 99,73\% \end{aligned} \quad (4)$$

Näin ollen prosessin rajojen ulkopuolelle jäävä osuus on $100\% - 99,73\% = 0,27\%$.

Prosessilla hyvä suorituskyky, jos tuotosten normaalijakauma asettuu selkeästi spesifikaation ylä- ja alarajojen väliin kuvan 3.1a mukaisesti, eli $6\sigma < (USL - LSL)$. Epävarman suorituskyvyn omaavassa prosessissa tuotokset jakaantuvat täsmälleen spesifikaation rajojen väliin, jolloin $6\sigma = (USL - LSL)$ kuvan 3.1b mukaisesti. Epävarman suorituskyvyn prosessi voi pystyä tuottamaan spesifikaation mukaisia tuotoksia, mutta keskiarvon liikkuminen vasemmalle tai oikealle johtaa välittömästi spesifikaatorajan ulkopuolisten tuotosten merkittävään lisääntymiseen. Prosessin suorituskyky on heikko, jos tuotosten jakauma ulottuu spesifikaation rajojen ulkopuolelle kuten kuvassa 3.1c eli $6\sigma > (USL - LSL)$. (Yang 2009)



Kuva 3.1. Normaalijakauman kuvaajat sekä spesifikaation ylärajat (USL) ja alarajat (LSL) korkean suorituskyvyn (a), marginaalisuorituskyvyn (b) ja heikon suorituskyvyn (c) prosesseissa.

Prosessin suorituskykyindeksi C_p .

Suorituskykyindeksi C_p on spesifikaation arvoalueen suhde tuotosten hajontaan, joka lasketaan kaavan 5 mukaisesti ja indeksin laskennassa oletetaan, että tuotosten otanta on normaalijakautunut. (Yang 2009)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (5)$$

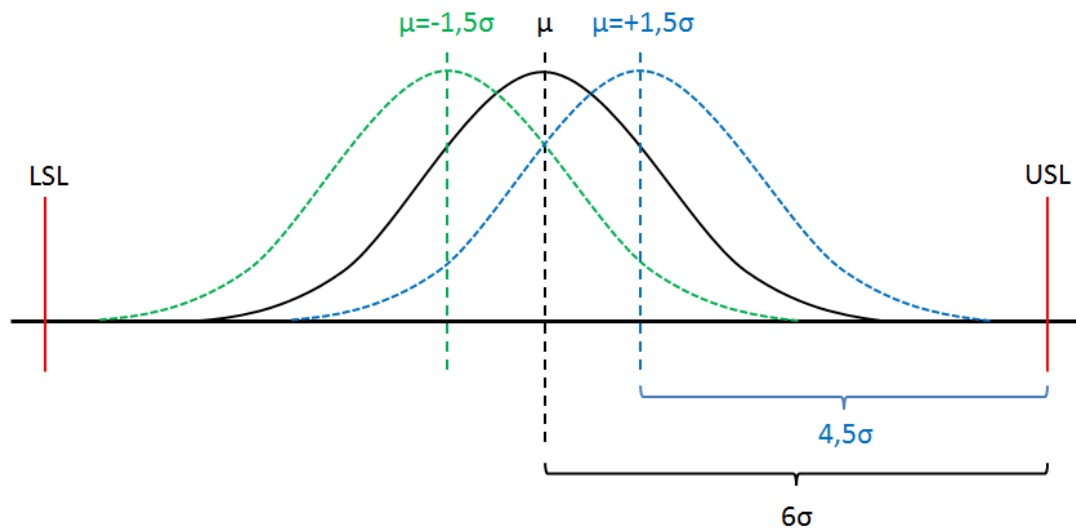
C_p suorituskykyindeksin laskennassa oletetaan, että tuotosten hajonta on normaalijakautunut ja keskiarvo on spesifikaatioalueen keskellä. Tällöin 3σ :n suorituskykytasolla C_p saa arvon 1,00, joka tarkoittaa, että noin 0,27 prosenttia osista on spesifikaatorajojen ulkopuolella eli noin 2700 osaa miljoonasta on viallisia tuotoksia. Samoja oletuksia noudattaen suorituskykyindeksin arvolla $C_p=1,67$ ollaan 5σ :n tasolla ja noin 0,000057 prosenttia osista on spesifikaatorajojen ulkopuolella eli noin 0,6 osaa miljoonasta on viallisia. (Yang 2009)

Prosessin suorituskykyindeksi C_{pk} .

Kaavan 6 mukaan laskettu prosessin suorituskykyindeksi C_{pk} on kehitetty ottamaan huomioon prosessin keskiarvon μ sijainti suhteessa spesifikaatorajoihin, koska prosessin keskiarvo ei useinkaan sijaitse täsmälleen spesifikaation arvoalueen keskellä. Todellisuudessa prosessin keskiarvo myös vaihtelee jonkin verran ajan saatossa. (Yang 2009)

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{3\sigma} \text{ ja } \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right\} \quad (6)$$

Six Sigma menetelmän tavoitteena on vähentää prosessin vaihteluita siten, että 12σ :n hajonta mahtuu spesifikaatorajojen sisäpuolelle. Kokemukset ovat osoittaneet, että pidemmän ajanjakson suorituskyky on yleensä heikompi kuin lyhyen ajanjakson suorituskyky. Todellisen prosessin ajansaatossa lisääntyvän vaihtelun huomioimiseksi suorituskykytasojen määrittelyssä on ryhdytty käyttämään $1,5\sigma$:n jakauman siirtoa. $1,5\sigma$:n jakauman siirron ajatuksena on, että prosessi, jonka suorituskyky lyhyellä ajanjaksolla on 6σ :n tasolla spesifikaatorajoihin nähden, on sen suorituskyky pidemmällä ajanjaksolla tarkasteltuna $4,5\sigma$:n tasolla riittävä. Kuvassa 3.2 on esitetty normaalijakauman $1,5\sigma$:n siirrot spesifikaation ala- ja ylärajojen suuntiin. (Yang 2009)



Kuva 3.2. Normaalijakauman $1,5\sigma$:n siirrot spesifikaation ala- ja ylärajojen suuntiin. (Yang 2009)

Vaikka Six Sigma prosessin jakauma ja sen keskiarvo siirtyisi $1,5\sigma$:n verran spesifikaation arvoalueen keskikohdasta, niin prosessi säilyttää vielä $4,5\sigma$:n pelivaran spesifikaatorajaan nähden molemmin puolin. Tällä varmistetaan, että pahimmassa tapauksessa prosessi tuottaa ainoastaan 3,4 virhettä miljoonassa mahdollisessa tapauksessa (DPMO, Defects per Million Opportunities). (Yang 2009) Kun kaavaan 1 sijoitetaan keskiarvoksi $\mu=1,5$, saadaan keskiarvon siirron vaikutus otettua huomioon arvioitaessa todennäköisten virheellisten tuotosten määrää. Kaavojen 2, 3 ja 4 avulla laskettu todennäköisyys sille, että prosessin tuotokset jakaantuvat välille $[-6\sigma, +6\sigma]$ on kaavojen 7 ja 8 mukainen.

$$X \sim N(1,5, 1) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P(-6\sigma \leq X \leq 6\sigma) &= P(X \leq 6\sigma) - P(X \leq -6\sigma) \\ &= \Phi(6\sigma) - \Phi(-6\sigma) \times 100\% = 99,99966\% \end{aligned} \quad (8)$$

Prosessin spesifikaatorajojen ulkopuolelle jäävä osuus on siten $100\% - 99,99966\% = 0,00034\%$ eli DPMO on 3,4.

Näin ollen on yleisesti hyväksytty määritelmä, että Six Sigma prosessi on prosessi, jossa 6σ :n tasolla virheiden määrä suhteessa miljoonaan mahdollisuuteen on 3,4. Taulukossa 3.1 on esitetty $1,5\sigma$:n jakauman siirrolla määritellyt sigma suorituskykytasot sekä niitä vastaavat suorituskykyindeksien arvot ja arviot laatuvirheiden aiheuttamista kustannuksista suhteessa prosessin tuottoihin. Suorituskykyindeksien laskennassa myös oletetaan, että suorituskykyindeksi C_p kuvaa ideaaliprosessin suorituskykyä ja C_{pk} todellisen prosessin suorituskykyä, jonka seurauksena C_{pk} -indeksin arvo on samalla sigma suorituskykytasolla 0,5 pienempi kuin C_p :n. Jakauman siirto $1,5\sigma$:lla ja indeksien ero 0,5 perustuvat empiiriseen määrittelyyn ja sen oikeellisuudesta käydään asiantuntijoiden kesken jatkuvasti keskustelua. (Watson 2005)

Taulukko 3.1. *Sigma-suorituskykytasot (Watson 2005).*

| Sigma suorituskykytaso | Virheiden määrä suhteessa miljoonaan mahdollisuuteen | Prosessin suorituskyky lyhyellä ajanjaksolla (C_p) | Prosessin suorituskyky pidemmällä ajanjaksolla (C_{pk}) | Laatuvirheiden aiheuttamat kustannukset (prosenttia tuotoista) |
|------------------------|--|--|---|--|
| 1,0 σ | 670 000 | Suorituskyvytön | Suorituskyvytön | |
| 1,5 σ | 500 000 | Suorituskyvytön | Suorituskyvytön | |
| 2,0 σ | 308 300 | Suorituskyvytön | Suorituskyvytön | 30 – 40% |
| 2,5 σ | 158 650 | Suorituskyvytön | Suorituskyvytön | |
| 3,0 σ | 66 807 | 1,0 | 0,5 | 20 – 30% |
| 3,5 σ | 22 700 | 1,17 | 0,67 | |
| 4,0 σ | 6 210 | 1,33 | 0,83 | 15 – 20% |
| 4,5 σ | 1 350 | 1,5 | 1,0 | |
| 5,0 σ | 233 | 1,67 | 1,17 | 10 – 15% |
| 5,5 σ | 32 | 1,83 | 1,33 | |
| 6,0 σ | 3,4 | 2,0 | 1,5 | <10% |

Todellisessa prosessissa sigma suorituskykytaso ja suorituskykyindeksit kannattaa määrittellä siten, että ne kuvaavat mahdollisimman hyvin prosessin kyvykkyyttä ja auttavat saavuttamaan korkean suorituskykytason. Seuraavat kaksi ohjetta auttavat tässä tehtävässä (Yang 2009):

1. Todellisen prosessin suorituskyvyn keskiarvon tulisi olla niin lähellä ideaalisuorituskykytasoa tai tavoitearvoa kuin mahdollista.
2. Prosessin suorituskykyhajonta tulisi olla pieni suhteessa toiminnallisiin raja-arvoihin

Six Sigma on myös data-ohjautuva, tilastanalyysiä hyödyntävä prosessin parannusmetodologia lähes täydellisen suorituskyvyn saavuttamiseksi. Tämä metodologia yhdistää täsmällisen, askel-askeleelta kulkevan analyttisen lähestymistavan tilastolliseen ongelmanratkaisuun hyödyntäen tilastollisia työkaluja, jotka ratkaisevat usean muuttujan ongelmat ja joita käytetään tietyssä vaiheessa osoittamaan poikkeamien lähteet ja de-

monstroimaan kuinka poikkeamat otetaan hallintaan siten, että se optimoi ja kontrolloi prosessin tuotosta. (Watson 2005)

Lisäksi Six Sigma on johtamisfilosofia. Liiketoiminnan filosofiana Six Sigma huomioi suoran linkin tuotevikojen ja käytettyjen liiketoimintakustannusten määrässä sekä yhtiön tuotteiden ja palveluiden asiakastyytyvyyden tason välillä. Liiketoimintafilosofiana Six Sigma luo rungon, joka sitoo yhteen liiketoiminnan kehityksen ja laatutoiminnan ja asettaa organisaatiolle yhteisiä tavoitteita, joiden toteutumista arvioidaan mittareilla kuten tuottavuus, kustannustehokkuus ja laatu. Six Sigma kehityskohteet tulisi olla linkitetty sekä organisaation strategiaan että liiketoiminnan tuloksiin käyttäen asiakkaiden odotuksia ja markkinoiden vaatimuksia määrittelykriteereinä kaikissa parannusprojekteissa. (Watson 2005)

Six Sigma menetit voidaan summata liiketoiminnan tehostamisen lähestymistavaksi, joka etsii ja eliminoi virheiden syyt tai laatuviat liiketoimintaprosessista keskittymällä tuotoksiin, jotka ovat merkityksellisiä asiakkaalle. Six Sigman sisältämät konseptit perustuvat siihen faktaan, että prosessi ja tuotevariaatiot ovat merkittäviä tekijöitä, jotka vaikuttavat tuotteen tuotannon läpimenoaikaan, tuotteen ja prosessin kustannuksiin, prosessin saantoon ja ennen kaikkea asiakastyytyvyyteen. (Watson 2005)

Lean-toiminnan periaatteet on johdettu lean-tuotantotavasta, joka on Toyotan alun perin kehittämä erittäin tehokas tuotantostrategia. Lean-tuotannon keskeisimpänä tavoitteena on tunnistaa ja eliminoida tuotantoprosessista *hukka* (waste) eli se toiminta, joka ei tuota lisäarvoa asiakkaalle. Moniin luonteeltaan tilastollisiin menetelmiin, kuten Six Sigma, verrattuna lean-toiminnan avulla voidaan tehokkaasti ratkaista useita sellaisia toiminnan tehokkuuteen liittyviä ongelmia, joita ei voida ratkaista tilastollisten menetelmien avulla. Toisaalta tilastopohjaisten Six Sigma – menetelmien avulla voidaan ratkaista tehokkaasti laatu- ja suorituskykyongelmia, joita ei voida osoittaa lean-toiminnan periaatteiden avulla. Näin ollen Six Sigman kaltaiset tilastolliset menetelmät ja lean-toimintaperiaatteet täydentävät hyvin toisiaan. (Yang 2009)

Six Sigman toteuttamiseksi käytettävät neljä pääprosessia ovat muutosjohtaminen, projektijohtaminen, ongelmanratkaisu (DMAIC) ja innovointi (DMADV) (Watson 2005). Näistä Six Sigma ongelmanratkaisuprosessi eli DMAIC on se, jonka kanssa useimmat ihmiset ovat tekemisissä. DMAIC:n avulla pyritään löytämään ja ratkaisemaan juurisyyt, jotka johtavat prosessin suorituskykyongelmiin ja suorituskykyvaihteluihin, mutta sillä ei muuteta varsinaista prosessin perusrakennetta. Tarkasteltaessa kuvan 2.4 prosessin elinkaarta niin DMAIC menetelmää voidaan käyttää vain vaiheesta neljä eteenpäin. (Yang 2009) DMAIC prosessin vaiheet ovat Define, Measure, Analyze, Improve ja Control eli määrittely, mittaus, analysointi, parannus ja ohjaus. Seuraavaksi kuvataan lyhyesti tehtävät DMAIC prosessin eri vaiheissa.

Määrittely (Define)

Muodosta liiketoiminnan ongelmasta Six Sigma kehitysprojekti ongelman ratkaisemiseksi. Perusta tiimi, jonka tehtävänä on suorittaa analyyskejä ja kehittää niiden pohjalta kehitysehdotuksia. Laadi aikataulu projektikatselmuksille ja määritä tarvittavat resurssit analyysien suorittamiseksi. Vaali aktiivista osallistumista prosessin omistajien ja muiden asianosaisten taholta, jotka ovat merkityksellisiä projektin tuotosten kannalta. Kehitä liiketoiminnan ongelmasta ylätasoinen määritelmä asiakkaan näkökulmasta, määritä asiakkaalle *tyytyväisyyden kannalta kriittiset* (CTS) tekijät ja tuota lähtötiedot tiimille projektin soveltamiseksi alkuperäiseen liiketoimintaongelmaan. Määrittelyvaiheessa tehtävä projektisuunnitelma on Six Sigma – asiantuntijan tuottama muodollinen esitys, jonka tarkoituksena on tuoda esiin organisaation ja sen johtoryhmän kyvykkyys ja tuki projektin läpiviemiseksi. (Watson 2005)

Mittaus (Measure)

Tunnista ne tuotteen tai prosessin pääpiirteet, mitkä ovat asiakkaan laatuvaatimusten kannalta kriittisiä ja vaikuttavat tuotoksen käytöstä muodostuvaan asiakastytyväisyyteen. Selkiytä prosessin toiminnan ymmärtämistä luomalla toimintokartta ja määrittelemällä mahdolliset syyt prosessin vikaantumiselle käyttäen *vika- ja vaikutusanalyysia* (FMEA). Määrittele prosessin kontrolloitavissa olevat tekijät. Määrittele asiakasvaatimusten mukainen suorituskystandardi tuotteen tai palvelun toimitusprosessille ja mittaa nykyinen suorituskystandardi ja vertaa sitä määriteltyyn suorituskystandardiin ja käytettävissä oleviin kilpailijavertailuanalyysihin. Määritä laatuvirheiden aiheuttamat kustannukset ja aseta parannustavoite. Validoi mittausjärjestelmän kyky havaita merkittävät muutokset prosessin suorituskystandardissa. Mittausvaiheen lopussa tulisi olla kokonaiskuva ongelman tilastollisesta määrittelystä, jonka avulla nykyisen prosessin suorituskystandardia voidaan arvioida suorituskystandardien C_p ja C_{pk} avulla. (Watson 2005)

Analysointi (Analyze)

Arvioi nykyisen prosessin toimintaa ja määritä mahdolliset suorituskystandardin vaihtelun aiheuttajat, jotka vaikuttavat kriittisiin suorituskystandardiparametreihin. Linkitä suorituskystandardin vaihtelun aiheuttajat prosessin valvontapisteisiin konkreettisten kehityskohteiden löytämiseksi. Analyysin pohjalta nähdään miten prosessia tulee säätää, jotta saavutetaan optimaalinen suorituskystandardi. Suorituskystandardivaihteluiden aiheuttajien löytämiseksi vaaditaan useita tiedonlouhintakerroksia ja tilastollisten työkalujen hyödyntämistä. Analysointivaiheessa tunnistetaan muuttujien joukosta merkittävimmät tekijät ja suorituskystandardiparametrit perustuen niiden tilastollisiin ja käytännön vaikutuksiin. (Watson 2005)

Parannus (Improve)

Seuraamalla mahdollisia suorituskystandardivaihteluiden aiheuttajia voidaan tunnistaa niiden vaikutukset keskiarvon vaihteluun prosessin tuotosten jakaumassa ja vähentää koko prosessin suorituskystandardivaihteluita. Määrittele parhaat toimintoparametrit ja toleranssit sekä alueet, joiden sisällä optimaalinen prosessi voidaan säilyttää. Parannusvaiheen työ-

kaluina käytetään yleensä koesuunnittelua (DOE, design of experiments), simulointia sekä asetus- ja sykliajan vähentämiseen käytettäviä lean-johtamisen työkaluja ja arvon parantamista. Parannusvaiheessa tehdään kokeiluja tai suositeltavan ratkaisun koeajoja, jotta löydetään optimaaliset asetukset *laadunkannalta kriittisille* (CTQ) parametreille. (Watson 2005)

Ohjaus (Control)

Mittausjärjestelmän validoinnilla varmistetaan, että sillä pystytään havaitsemaan ja raportoimaan tarkasti prosessin suorituskyvyssä tapahtuvat merkittävät muutokset. Laske prosessin suorituskyky tekemällä suositellut muutokset. Kehitä ohjaussuunnitelma, jonka avulla voidaan ylläpitää prosessin parannettua suorituskykyä. Toteuta prosessinohjausta parannetussa prosessissa ja kouluta käyttäjät, jotta varmistetaan, että heidän henkilökohtainen kyvykkyys tulkita ohjeita ja suorittaa prosessin kehitystoimenpiteitä. Ohjausvaihe päättää prosessin kehitysprojektin ja prosessiin tehdyt parannukset tulevat osaksi päivittäistä johtamisjärjestelmää. (Watson 2005)

4 DESIGN FOR SIX SIGMA

Six Sigman innovointiprosessille eli Design for Six Sigmalle on olemassa useita erinimisiä menetelmiä kuten Watsonin (2005) kuvaama DMADV ja Yangin (2009) ICOV. DMADV lyhenne muodostuu prosessin viidestä vaiheesta, jotka ovat Define, Measure, Analyze, Design ja Verify eli määrittely, mittaus, analysointi, suunnittelu ja verifiointi. ICOV muodostuu puolestaan vaiheista Identify, Characterize, Optimize ja Verify eli tunnistus, karakterisointi, optimointi ja verifiointi. Näiden lisäksi on myös IDOV, joka on rinnakkainen ICOV menetelmän kanssa sekä mm. DCCDI ja DMEDI menetelmät. Kaikki DFSS menetelmät käyttävät lähes samoja työkaluja kuten QFD, FMEA, kilpailijavertailuanalyysi (benchmarking), koesuunnittelu (DOE), simulointi, tilastollinen optimointi, robusti suunnittelu jne. ja siitä johtuen menetelmien vertaaminen toisiinsa on melko hankalaa (Yang 2009).

Kun tuote on käynyt läpi kehitysprosessin vaiheet, niin tämän jälkeiset ongelmat, sattumukset tai puutteet suorituskyvyssä tai liiketoiminnan johtamisessa korjataan käyttäen Six Sigma ongelmanratkaisuprosessia DMAIC. Watsonin (2005) mukaan DFSS on ryhmä menetelmiä, jotka on kehitetty erityisesti tuotteiden kehittämiseen siten, että niitä voidaan tuottaa sujuvasti ja erittäin korkealla laatusollalla. DFSS sisältää joukon strategioita, taktiikoita ja työkaluja, jotka auttavat organisaatiota kuvaamaan, ilmaisemaan määrällisesti ja pienentämään riskiä jokaisessa tuotteen, prosessin ja palvelun kehittämisvaiheessa. DFSS menetelmää käytetään yhdessä kokonaisvaltaisen Six Sigma strategian kanssa, mutta se ei korvaa organisaation käyttämää suunnittelu- tai tuotekehitysprosessia vaan sillä pyritään parantamaan tai uudelleensuunnittelemaan olemassa olevaa prosessia. (Watson 2005) Yleisen Lean Six Sigma menetelmän käyttö tuotekehitysprosessissa ei ole suositeltavaa ja se voi jopa haitata olemassa olevaa tuotekehitysprosessia. Suositeltava tapa Six Sigma ja Lean Six Sigma menetelmien soveltamiseen tuotekehitysprosessissa on käyttää hyväksi havaittua Design for Six Sigma lähestymistapaa (Yang 2009). DFSS:n kolme pääkomponenttia on: tuotelinjojen hallinta, suunnittelu ja uuden tuotteen kehitysprojektin johtaminen ja sen päätavoitteena on suunnitella tuotteita, prosesseja tai palveluita, jotka johdonmukaisesti vastaavat asiakkaan odotuksia. (Watson 2005) Myös DFSS:ssa prosessi voi olla tuote tai kehitysprosessi, johon menetelmiä ja työkaluja hyödynnetään.

Kirjallisuudessa on käsitteen Design for Six Sigma (DFSS) määritelmä pyritty usein tiivistämään johonkin fraasiin tai muutaman lauseen pituiseen kuvaukseen. Koska DFSS:lle ei ole olemassa vakiintunutta ja yleisesti käytössä olevaa kuvausta, niin siitä löytyy monia eri versioita.

Watson (2005) määrittelee DFSS:n seuraavasti:

”Design for Six Sigma on prosessi, jonka avulla voidaan määritellä, suunnitella ja toimittaa innovatiivisia tuotteita, palveluita ja prosesseja, mitkä tuottavat kilpailukykyisesti kiinnostavaa arvoa asiakkaille tavalla, joka täyttää laadun kannalta kriittiset ominaispiirteet kaikille merkittävälle toiminnolle.”.

Yangin (2009) määritelmä DFSS:lle voidaan puolestaan kiteyttää seuraavaan fraasiin: ”Suunnittele oikein ensimmäisellä kerralla”.

Design for Six Sigma on systemaattinen lähestymistapa suunniteltujen tuotteiden kehittämiseen asiakasarvon, laadun, luotettavuuden ja kustannusten näkökulmasta ja siinä on hyvin paljon samoja piirteitä kuin tuotekehitysprosessissa. Tuotesuunnittelu ja -kehitys ovat monelle yritykselle tärkeimpiä prosesseja, koska kehitetyt tuotteet toimivat usein pääasiallisena tulonlähteenä. Yangin (2009) mukaan DFSS menetelmä tukee vahvasti innovointiprosessia ja se voi parantaa merkittävästi yrityksen innovointikykyä. Samalla tavalla kuin Six Sigma ja Lean-tuotantoprosessi ovat toisiaan täydentäviä menetelmiä, niin myös DFSS ja Lean tuotekehitysprosessi täydentävät toisiaan. (Yang 2009)

4.1 Lean tuotekehitysprosessi

Lean tuotekehitysprosessin tavoitteena on nopeuttaa tuotekehitysprosessia ja tuottaa enemmän lisäarvoa tuotteeseen käyttäen vähemmän resursseja (Yang 2009):

- määrittämällä perusteellisesti asiakkaan tarpeet (voice of the customer, VOC) ja siirtämällä asiakasarvo huolellisesti tuotteeseen
- toteuttamalla korkea tuotearvo ja laatu sekä alhaiset tuotekustannukset käyttämällä sopivimpia teknologisia ratkaisuja, muotoilua ja rakenteita
- siirtämällä tehokkaasti asiakastarpeet korkealaatuiseen tuotteeseen nopeasti ja vähäisin kustannuksin
- vähentämällä jatkuvasti tuotekehitysprosessin hukkatekijöitä

DFSS:n avulla voidaan tehokkaasti ratkaista huonon tuotearvon aiheuttavat hukkatekijät, jotka liittyvät Yangin (2009) kuvaaman lean tuotekehitysprosessin alkupäähän. DFSS on Six Sigma – menetelmä, jota käytetään tarkasteltavan prosessin perusrakenteiden muuttamiseen tai uudelleensuunnitteluun. Tarkasteltaessa kuvassa 2.4 esitettyä prosessin elinkaarta, DFSS:aa hyödynnetään vaiheissa 1-3, joita Yang (2009) kutsuu elinkaaren ylävirran toiminnaksi ja myöhempiä vaiheita alavirran toiminnaksi. DFSS:n tavoitteena on suunnitella tai uudistaa prosessin rakenne siten, että prosessi saavuttaa

maksimaalisen asiakastyytyväisyyden ja toteuttaa jatkuvasti siltä vaaditut toiminnot. (Yang 2009)

4.2 Design for Six Sigman vaiheet

Tässä työssä Design for Six Sigman vaiheiden kuvaamiseen käytetään Yangin (2009) esittämää ICOV-menetelmää.

ICOV-menetelmän vaiheet ovat:

- vaatimusten tunnistaminen (identify requirements)
- suunnitelman karakterisointi (characterize the design)
- suunnitelman optimointi (optimize the design)
- suunnitelman verifiointi (verify the design)

4.2.1 Vaihe I: Vaatimusten tunnistaminen

Askel 1: Hankesuunnitelman luonnostelu

Tämän askeleen sisältö on lähes sama kuin DMAIC parannusprojektissa, mutta projekti on yleensä pidempikestoinen ja alkukustannukset korkeammat. Projektin pidempi kesto johtuu tarpeesta suunnitella tai uudelleensuunnitella eri kokonaisuuksia eikä ainoastaan paikata nykyisessä rakenteessa olevia virheitä. Korkeammat alkukustannukset johtuvat asiakasvaatimusten laajemmasta selvityksestä ja tutkimisesta.

Askel 2: Asiakas- ja liiketoimintavaatimusten tunnistaminen

Tässä askeleessa asiakkaat määritellään tarkasti ja heidän tarpeet tutkitaan ja analysoidaan käyttäen apuna esimerkiksi QFD-menetelmää ja Kano-analyysia. Seuraavaksi määritellään *tyytyväisyyden kannalta kriittiset* (CTS, critical-to-satisfaction) mittarit, joiden avulla suunnitelmaa voidaan arvioida.

Alla on yhteenvetona luettelo tämän vaiheen tehtävistä:

- menetelmien määrittäminen asiakkaan vaatimusten ja toiveiden selvittämiseksi
- asiakkaan vaatimusten ja toiveiden kerääminen sekä niiden muuntaminen VOC-listaan
- VOC-listan muuntaminen toiminnallisiksi ja mitattaviksi vaatimuksiksi
- vaatimusten viimeistely: minimi vaatimusten määrittely, sovellus- ja käyttöympäristön validointi

- CTS-mittarien kuten laadun kannalta kriittisten (CTQ, critical-to-quality), toimituksen kannalta kriittisten (CTD, critical-to-delivery) ja kustannusten kannalta kriittisten (CTC, critical-to-cost) mittarien määrittäminen ja ilmaiseminen määrällisesti
- hyväksyttävän suorituskykytason ja toimintaikkunan määrittäminen

Tässä vaiheessa voidaan käyttää seuraavia DFSS-työkaluja:

- markkina- ja asiakastutkimukset
- QFD-menetelmä
- Kano-analyysi
- riskianalyysi

4.2.2 Vaihe C: Suunnitelman karakterisointi

Askel 1: Asiakasvaatimusten muuntaminen tuotteen/prosessin toiminnallisiksi vaatimuksiksi

Asiakasvaatimukset antavat ideoita siitä miten asiakkaan tarpeet saadaan tyydytettyä, mutta niitä ei voida käyttää sellaisenaan tuotteen tai prosessin vaatimuksina suunnittelussa. Asiakasvaatimukset tulee muuntaa tuotteen tai prosessin toiminnallisiksi vaatimuksiksi esimerkiksi QFD-menetelmään sisältyvän laatutalo-työkalun (House of Quality) avulla.

Askel 2: Suunnitelmavaihtoehtojen luominen

Kun suunniteltavan kokonaisuuden eli tuotteen, palvelun tai prosessin toiminnalliset vaatimukset on määritelty, tulee kyseinen kokonaisuus karakterisoida eli kehittää suunniteltavat elementit, jotka toteuttavat toiminnalliset vaatimukset. Yangin (2009) mukaan yleensä tarjolla on kaksi vaihtoehtoa:

1. Kaikki vaatimukset on mahdollista toteuttaa tyydyttävällä tavalla olemassa olevan teknologian tai tunnetun suunnittelukonseptin avulla. Tämä vaihtoehto johtaa hyvin yksinkertaisen kehitysprojektin läpiviemiseen.
2. Kaikkia vaatimuksia ei ole mahdollista toteuttaa olemassa olevalla teknologialla tai tunnetuilla malleilla ja tarvitaan uusi suunnittelukonsepti, joka tulisi suunnitella. Uusi suunnitelma voi olla perusrakenteeseen verrattuna radikaalinen innovaatio tai vähittäinen eli inkrementaalinen innovaatio.

Askel 3: Suunnitelmavaihtoehtojen arvioiminen

Edellisessä askeleessa on mahdollisesti muodostunut useita suunnitelmavaihtoehtoja, jotka tulee seuraavaksi arvioida lopullisen konseptin valintaa varten. Suunnitelmavaihtoehtojen arviointiin voidaan käyttää useita menetelmiä kuten Pugh konseptin valintamenetelmää, suunnittelukatselmuksia sekä vika- ja vaikutusanalyysia (FMEA). Arvioinnin yhteydessä konseptivaihtoehtoista saattaa löytyä puutteita, jotka täytyy korjata ennen konseptin lopullista valintaa. Prosessin suunnitelmavaihtoehtojen arviointiin voidaan käyttää myös prosessijohtamisen tekniikoita.

Tässä vaiheessa voidaan käyttää seuraavia DFSS-työkaluja:

- Systemaattinen innovointi- ja ongelmanratkaisumenetelmä (TRIZ)
- Quality function deployment – menetelmä (QFD)
- Aksiomaattinen suunnittelu
- Robusti-suunnittelu
- Design for X – menetelmä (DFX)
- Suunnittelun ja suorituskyvyn vika- ja vaikutusanalyysit (DFMEA ja PFMEA)
- Suunnittelukatselmukset
- CAD/CAE
- Simulointi
- Prosessijohtaminen

4.2.3 Vaihe O: Suunnitelman optimointi

Tämän vaiheen tuloksena syntyy optimoitu suunnittelukokonaisuus eli *tuotos*, joka täyttää kaikki toiminnalliset vaatimukset Six Sigma suoritustasolla.

Tämän saavuttamiseksi käytetään yleensä seuraavia DFSS-työkaluja:

- suunnittelu- ja simulointityökalut
- koesuunnittelu (DOE, Design of Experiments)
- Taguchi-menetelmä, parametrisuunnittelu, toleranssisuunnittelu
- luotettavuuden suunnittelu
- kestävyysarviointi

4.2.4 Vaihe V: Suunnitelman validointi

Askel 1: Pilottitestausta ja paranteleminen

Yhtään tuotetta tai palvelua ei saisi viedä markkinoille ilman pilottitestausta ja lopullista hienosäätöä. Tähän voidaan käyttää suunnittelun vika- ja vaikutusanalyysia (DFMEA),

prototyyppejä ja osakokonaisuuksia, joiden avulla testataan ja arvioidaan suorituskykyä todellisessa ympäristössä.

Askel 2: Validointi ja prosessinohjaus

Tässä askeleessa suoritetaan uuden tuotoksen validointi, jolla varmistetaan, että lopullinen tuote tai palvelu on suunniteltu siten, että se täyttää suunnittelun vaatimukset. Samalla varmistetaan, että valmistuksen ja tuotannon prosessin ohjaus toteuttaa kaikki optimointivaiheessa (O) määritellyt ominaispiirteet spesifikaation mukaisesti.

Askel 3: Täysi kaupallinen käyttöönotto ja luovutus uudelle prosessinomistajalle

Kun uusi tuotos on validoitu ja prosessin ohjaus todennettu, seuraavaksi voidaan suorittaa tuotoksen lanseeraus ja täysi kaupallinen käyttöönotto. Tukiprosessien avulla tuotos siirtyy seuraavaksi uudelle prosessinomistajalle ja kehitysvaiheen vaatimusten asettelu, ohjaus ja valvontajärjestelmät lopetetaan.

Tässä vaiheessa voidaan käyttää seuraavia DFSS-työkaluja:

- prosessin kyvykkyyden mallintaminen
- koesuunnittelu (DOE)
- luotettavuustestaus (reliability testing)
- virheenestomenetelmä, Poka-yoke
- luotettavuusanalyysi (confidence analysis)
- prosessinhallinnan suunnittelu
- koulutus

Traktorin tuotekehitysprosessissa pilottitestaus tarkoittaa käytännössä traktorin, alisysteemin tai komponentin validointitestausta. Yhä kiristyvä kilpailu on johtanut siihen, että tuotekehitykseen käytettävissä oleva aika vähenee koko ajan ja näin ollen suunnittelun tehokkuus ja laaduntuottokyky ovat nousseet yhä merkittävämmiksi tekijöiksi tuotekehitysprosessissa. Tämä vaatii sujuvan tuotekehitysprosessin, joka tuottaa jatkuvasti asiakasvaatimusten mukaisia tuotoksia tehokkaasti ja systemaattisia toimintatapoja sekä yhtäaikaista suunnittelua hyödyntäen (Yang 2009). Validointitoiminnan harjoittaminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tuotekehitysprosessin ylävirrassa mahdollistaa vähäisemmän suunnittelusyklimäärän, prototyypimäärän ja fyysisen testaamisen, mikä auttaa alentamaan tuotekehitysprojektin kustannuksia.

Kuten luvussa kaksi todettiin, AMPIP2.1-prosessissa validointi on esitetty omana vaiheenaan DR-portin jälkeen, mutta suunnittelun validointi on itse asiassa tuotekehityksen aliproessi, joka alkaa jo määrittely-vaiheesta ja jatkuu aina OS-porttiin saakka.

5 SUUNNITTELUN VALIDOINTI

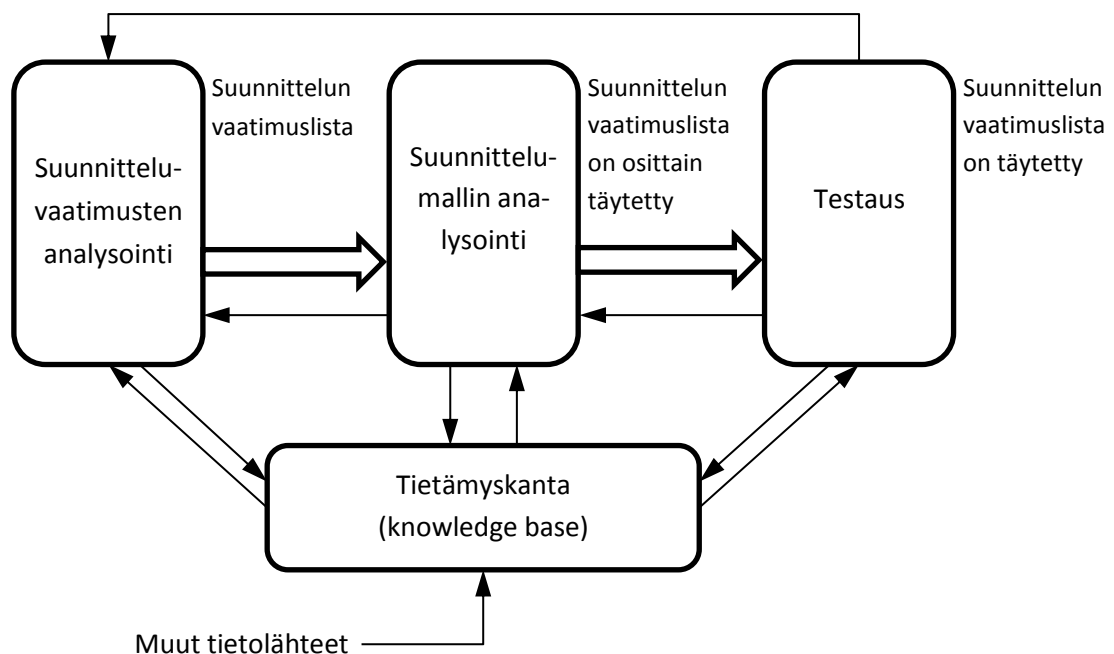
Suunnittelun validointi on prosessi, jonka avulla voidaan verifioida, että optimoidun tuotteen ja prosessin suunnittelu vastaa asiakasvaatimusten mukaista suorituskykyä. Suunnittelun validointi koostuu *tuotesuunnittelun validoinnista*, *valmistusprosessin validoinnista* ja *tuotannon validoinnista*, mutta tässä tutkimuksessa keskitytään käsittelemään ainoastaan tuotesuunnittelun validointia ja tuotekehityksen näkökulmasta se tulisi koostua seuraavista kohdista (Yang 2009):

- toiminnallisen suorituskyvyn validointi
- käyttöympäristön asettamien vaatimusten validointi
- luotettavuusvaatimusten validointi
- käyttövaatimusten validointi
- turvallisuusvaatimusten validointi
- rajapinta- ja yhteensopivuusvalidointi
- huollettavuusvaatimusten validointi

Kaikkien systeemin osien osalta ei ole tarvetta suorittaa jokaista validointivaihetta sillä validointivaatimukset ja niiden tärkeys ovat erilaisia eri tuotteille ja systeemin osille. Suunnittelun validointiprosessin sisältö tulisi koota valitsemalla sopivimmat alueet yllä olevasta luettelosta. (Yang 2009)

6 TUOTESUUNNITTELUN VALIDOINTI

Hyvään tuotekehitysstrategiaan kuuluu, että tuotesuunnittelun validointi aloitetaan paljon ennen suunnittelun viimeistä vaihetta. Tuotesuunnittelun validoinnin suorittaminen ainoastaan suunnittelun viimeisessä vaiheessa johtaa yleensä moniin ongelmiin kuten kalliiseen uudelleensuunnitteluun sekä viivästyttää markkinoille tuloa. Esimerkiksi tietokonesimulointia ja varhaisen vaiheen prototyyppejä voidaan käyttää konseptin validointiin. Tuotesuunnittelun validoinnin keskeisin tehtävä on varmistaa, että kaikki suunnitteluvaatimukset kuten toiminnallisen suorituskyvyn vaatimukset ja luotettavuusvaatimukset tulee täytetyksi. Varmistamiseen käytettävät menetelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan: *suunnittelumallin analysointi* ja *testaus*. Kuvassa 6.1 on tuotesuunnittelun validointiprosessin vuokaavio, joka kuvaa suunnitteluvaatimusten, suunnittelumallin analysoinnin ja testauksen välisiä riippuvuuksia. Vuokaaviosta voidaan päätellä, että tuotteen validointisuunnitelman tekeminen kannattaa aloittaa koostamalla kattava vaatimuslista tuotteelle asetettujen vaatimusten pohjalta. (Yang 2009) Seuraavaksi tarkastellaan Yangin (2009) kuvaamaa vaiheittaista tuotesuunnittelun validoinnin periaatetta.



Kuva 6.1. Tuotesuunnittelun validointiprosessin vuokaavio (Yang 2009).

Vaihe 0: Varhaisen vaiheen validointi

Tämä vaihe aloitetaan konseptin luonnilla, jonka jälkeen luodaan konseptin mukainen tuoterakenne ja aloitetaan tuotteen rakenteen suunnittelu CAE-järjestelmiä hyödyntäen. Traktorin ja sen komponenttien käyttäytymisen tutkimiseen käytetään tietokonesimulointimalleja ja ensimmäisellä fyysisellä prototyypillä (*alpha prototype*) suoritettavia testejä ja mittauksia. Taguchi robust design – menetelmää voidaan käyttää kohinaefektin (*noise effect*) simuloimiseen yhdessä simulointimallien ja prototyypin kanssa. Taguchi – menetelmä voidaan ottaa mukaan käyttöympäristön vaatimusten, käyttövaatimusten ja luotettavuusvaatimusten validointiin. Käyttöympäristön ja käytön variaatiot sekä vikaantuminen voidaan mallintaa kohinatekijöiksi (*noise factors*) Taguchi parametrisuunnitteluprojektissa. Luovan suunnittelun kannalta varhaisen vaiheen validointi on erittäin tärkeää, koska konseptia ei ole testattu tätä aikaisemmin.

Vaihe 1: Suorita suunnittelukatselmuksia ja suunnitteluvaatimusten analyysyjä

Vaihe 2: Valmista tuotantotyyppisiä prototyyppejä (beta prototypes)

Vaihe 3: Suorita verifiointitestaus prototyyppien avulla

Verifiointitestit tulee olla suunniteltu huolella ja niissä on pyrittävä huomioimaan kaikki tuotesuunnittelun validointiin sisältyvät asiat kuten toiminnallisen suorituskyvyn validointi ja luotettavuusvaatimusten validointi. Monimutkaisissa tuotteissa testit voidaan jakaa komponentti-, alisysteemi- ja systeemitason testeihin.

Vaihe 4: Arvioi ja verifioi prototyyppien suorituskyky

Tämän vaiheen tarkoituksena on analysoida verifiointitestien tuloksia ja arvioida prototyypin suorituskykyä. Jos prototyypin suorituskyvyn katsotaan vastaavan tavoitteita, niin siirrytään vaiheeseen 6. Muussa tapauksessa siirrytään vaiheeseen 5.

Vaihe 5: Ratkaise suorituskykypuutteet ja valmista lisää prototyyppejä testausta varten

Tämä vaihe on ns. ”korjaa” kohta ennen seuraavana tulevaa ”rakenna” kohtaa ”rakenna-testaa-korjaa” syklissä. Ihanteellisessa tilanteessa ei jouduta läpikäymään vaihetta 5, mutta todellisessa suunnitteluprosessissa tältä ei voida välttyä. Aikaisen vaiheen toimenpiteet kuten etukäteen tehdyt tietokonesimuloinnit ja alpha-prototyypit vähentävät rakenna-testaa-korjaa – sykliin käytettävää aikaa. Tämän vaiheen jälkeen siirrytään takaisin vaiheeseen 3 ja tehdään uusia testejä.

Vaihe 6: Hyväksy tuotteen rakenne

7 VALIDOINNIN TYÖKALUT JA NIIDEN VERIFIKOINTI

7.1 Suunnitteluvaatimusten analysointi

Suunnitteluvaatimusten analysoinnin tarkoituksena on koostaa vaatimuslista tuotteelle asetettujen vaatimusten pohjalta. Vaatimuslistan tulee olla täydellisen kattava, tarkka ja spesifinen ja vaatimukset tulee asettaa keskinäiseen tärkeysjärjestykseen. (Yang 2009) Suunnitteluvaatimusten analysoinnin helpottamiseksi käsitellään seuraavaksi Yangin (2009) esittämää suunnitteluvaatimusten luetteloa, jossa jokaiselle vaatimustyyppille on kirjoitettu ohje kuvauksen, tiedonlähteiden, tarvittava detalji-tason, vaatimuksien tärkeysjärjestyksen sekä aikaisempien validointitulosten ja tietämyskannan määrittämistä varten.

Toiminnallisen suorituskyvyn vaatimukset (Yang 2009)

Kuvaus: Tässä listataan kaikki toiminnallisen suorituskyvyn tavoitearvot ja spesifikaatiot.

Tiedonlähteet: Konseptisuunnittelu- ja detaljisuunnitteluvaiheessa tietoa kerätään suunnittelu- ja tuotekehitysryhmiltä sekä suunnitteluosastolta.

Tarvittava detalji-taso: Mitä tarkempi, niin sen parempi. Merkittävimmille toiminnallisen suorituskyvyn vaatimuksille numeeriset tavoitearvot ja spesifikaatiot ovat hyvin suositeltavia. Monimutkaisten tuotteiden kohdalla suorituskykyvaatimukset voidaan jakaa hierarkkisesti systeemi-, alisysteemi- ja komponentti vaatimuksiksi ja spesifikaatioiksi.

Vaatimuksien tärkeysjärjestys: Vaatimukset tulee pisteyttää keskinäiseen tärkeysjärjestykseen, jotta työpanokset osataan kohdentaa toiminnallisen suorituskyvyn kannalta eniten vaikuttaviin asioihin.

Aikaisemmat validointitulokset ja tietämuskanta: Olemassa oleva tietämuskanta ja aikaisemmat validointitulokset tulee käydä läpi ja kaikki oleellinen informaatio tulee ottaa käyttöön. On hyvä määrittää, että kuinka paljon tietoa aikaisemmista validointituloksista ja tietämuskannasta voidaan hyödyntää suoraan kyseissä validointiprosessissa ja mitä lisätietoa tulee hankkia uusissa suunnitteluanalyseissä ja testeissä vaatimusten validoimiseksi.

Käyttöympäristön asettamat vaatimukset (Yang 2009)

Kuvaus: Tässä kootaan luettelo käyttö- ja käyttöympäristöprofiileista, joissa tuotteen on tarkoitus toimia suunnitellulla tavalla. Näitä ovat esimerkiksi korkeat ja matalat lämpötilat, iskut ja värinä, kosteus, tuuli, suola ja pöly. Tämä sisältää myös toiminnalliset suorituskykyvaatimukset ja muut vaatimuksen tavoitearvot ja spesifikaatiot kyseisessä tapauksessa määritellyissä käyttö- ja käyttöympäristöprofiileissa. Esimerkiksi akkua voidaan käyttää korkeissa ja matalissa lämpötiloissa tai kosteissa ja kuivissa olosuhteissa. Tällöin tulee tietää, että millä alueella arvot ovat kyseisissä lämpötila- ja ilmankosteusprofiileissa ja määritellä ne yksityiskohtaiseen spesifikaatioon. Akun tapauksessa määriteltäisiin vaadittava jännitystaso, kestoikä jne. sellaisissa olosuhteissa, jossa lämpötila vaihtelee välillä -50.. ..+50°C ja suhteellinen ilmankosteus välillä 0.. ..100%.

Tiedonlähteet: Aikaisemmat projektit, tietämuskanta, asiakaskyselyt ja kilpailijoiden nykyinen taso.

Tarvittava detajli-taso: Mitä tarkempi, niin sen parempi.

Vaatimusten tärkeysjärjestys: Vaatimukset tulee pisteyttää keskinäiseen tärkeysjärjestykseen.

Aikaisemmat validointitulokset ja tietämuskanta: Olemassa oleva tietämuskanta ja aikaisemmat validointitulokset tulee käydä läpi ja kaikki oleellinen informaatio tulee ottaa käyttöön.

Luotettavuusvaatimukset (Yang 2009)

Kuvaus: Tämä sisältää listan vaatimuksista kuten suunniteltu käyttöikä, toiminnallisen suorituskyvyn heikkenemisen taso ja toiminnallisten vikojen hyväksyttävä taso.

Tiedonlähteet: Aikaisemmat projektit, tietämuskanta, asiakaskyselyt ja kilpailijoiden nykyinen taso.

Tarvittava detajli-taso: Mitä tarkempi, niin sen parempi.

Vaatimusten tärkeysjärjestys: Vaatimukset tulee pisteyttää keskinäiseen tärkeysjärjestykseen.

Aikaisemmat validointitulokset ja tietämuskanta: Olemassa oleva tietämuskanta ja aikaisemmat validointitulokset tulee käydä läpi ja kaikki oleellinen informaatio tulee ottaa käyttöön.

Käyttövaatimukset (Yang 2009)

Kuvaus: Tämä sisältää listan tuotteen käyttöprofiileista sen tarkoituksen mukaisessa käytössä sekä kuvaukset siitä miten asiakas voi väärinkäyttää tuotetta.

Tiedonlähteet: Aikaisemmat projektit, tietämuskanta, asiakaskyselyt ja kilpailijoiden nykyinen taso.

Tarvittava detajli-taso: Mitä tarkempi, niin sen parempi.

Vaatimusten tärkeysjärjestys: Vaatimukset tulee pisteyttää keskinäiseen tärkeysjärjestykseen.

Aikaisemmat validointitulokset ja tietämuskanta: Olemassa oleva tietämuskanta ja aikaisemmat validointitulokset tulee käydä läpi ja kaikki oleellinen informaatio tulee ottaa käyttöön.

Turvallisuusvaatimukset (Yang 2009)

Kuvaus: Tämä sisältää listan turvallisuusvaatimuksista itse tuotteen, tuotteen rakenteen ja käytön näkökulmasta.

Tiedonlähteet: Voimassa olevat ja tulevat standardit ja viranomaismääräykset, yrityksen sisäiset standardit, aikaisemmat projektit, tietämuskanta, asiakaskyselyt ja kilpailijoiden nykyinen taso.

Tarvittava detajli-taso: Mitä tarkempi, niin sen parempi.

Vaatimusten tärkeysjärjestys: Vaatimukset tulee pisteyttää keskinäiseen tärkeysjärjestykseen.

Aikaisemmat validointitulokset ja tietämuskanta: Olemassa oleva tietämuskanta ja aikaisemmat validointitulokset tulee käydä läpi ja kaikki oleellinen informaatio tulee ottaa käyttöön.

Rajapinta- ja yhteensopivuusvaatimukset (Yang 2009)

Kuvaus: Tämä sisältää listan rajapinta- ja yhteensopivuusvaatimuksista riippuen siitä tarkastellaanko asiaa koko systeemin, alisysteemin vai komponentin näkökulmasta. Itse tuotteen rajapinta- ja yhteensopivuusvaatimuksia tulee tarkastella toisten tuotteiden ja varusteiden näkökulmasta.

Tiedonlähteet: Konseptisuunnittelu- ja detaljisuunnitteluvaiheessa tietoa kerätään suunnittelu- ja tuotekehitysryhmiltä sekä suunnitteluosastolta. Jos toiset tuotteet tai varusteet toimittaa jokin toinen yritys, niin rajapinta- ja yhteensopivuusvaatimukset voi olla mahdollista saada heiltä tai ne tulee selvittää yhdessä heidän kanssa. Aikaisemmat projektit, tietämuskanta, asiakaskyselyt ja kilpailijoiden nykyinen taso voivat olla myös tässä apuna.

Tarvittava detajli-taso: Mitä tarkempi, niin sen parempi.

Vaatimusten tärkeysjärjestys: Vaatimukset tulee pisteyttää keskinäiseen tärkeysjärjestykseen.

Aikaisemmat validointitulokset ja tietämuskanta: Olemassa oleva tietämuskanta ja aikaisemmat validointitulokset tulee käydä läpi ja kaikki oleellinen informaatio tulee ottaa käyttöön. On hyvä määrittää, että kuinka paljon tietoa aikaisemmista validointituloksista ja tietämuskannasta voidaan hyödyntää suoraan kyseissä validointiprosessissa ja mitä lisätietoa tulee hankkia uusissa suunnitteluanalyysissä ja testeissä vaatimusten validoimiseksi.

Huollettavuusvaatimukset (Yang 2009)

Kuvaus: Tämä sisältää listan huollettavuusvaatimuksista.

Tiedonlähteet: Aikaisemmat projektit, tietämuskanta, asiakaskyselyt ja kilpailijoiden nykyinen taso.

Tarvittava detajli-taso: Mitä tarkempi, niin sen parempi.

Vaatimusten tärkeysjärjestys: Vaatimukset tulee pisteyttää keskinäiseen tärkeysjärjestykseen.

Aikaisemmat validointitulokset ja tietämuskanta: Olemassa oleva tietämuskanta ja aikaisemmat validointitulokset tulee käydä läpi ja kaikki oleellinen informaatio tulee ottaa käyttöön. On hyvä määrittää, että kuinka paljon tietoa aikaisemmista validointituloksista ja tietämuskannasta voidaan hyödyntää suoraan kyseissä validointiprosessissa ja mitä lisätietoa tulee hankkia uusissa suunnitteluanalyysissä ja testeissä vaatimusten validoimiseksi.

Suunnitteluvaatimusten analysoinnissa on hyvin suositeltavaa koota lista suunnitteluvaatimuksista niin aikaisessa vaiheessa kuin mahdollista ja niin yksityiskohtaisesti kuin mahdollista sekä hyödyntää olemassa olevaa tietämuskantaa niin paljon kuin mahdollista. Näin tuotesuunnittelun validointiprosessi voidaan aloittaa mahdollisimman aikaises-

sa vaiheessa tuotekehityssykliä ja tuotemallin analysointi ja testaussuunnitelma voidaan luoda ja toteuttaa tehokkaasti ja taloudellisesti. Monissa käytännötilanteissa ja etenkin luovassa suunnittelussa tarvitaan useita ”vaatimus-analysointi-testaus” iteraatiokierroksia, jotta kaikki vaatimukset täytetään tyydyttävällä tasolla. Jokaisessa vaatimus-analysointi-testaus iteraatiokierroksessa tulisi pyrkiä keräämään niin paljon informaatiota kuin mahdollista, jotta iteraatiokierrosten määrä olisi mahdollisimman pieni. (Yang 2009)

7.2 Tuotemallin analysointi

Tuotemallin analysointi (design analysis) on kokoelma analyttisiä menetelmiä, joita voidaan käyttää suunnitteluvaatimusten analysointiin ja validointiin tai osittaiseen validointiin sekä suunnittelumuutosehdotusten tekemiseen. Tuotemallin analysointi voidaan jakaa karkeasti kolmeen kategoriaan, jotka ovat suunnittelukatselmuksien ja tarkastusmenetelmät, matemaattiset mallit sekä virtuaalitestaus- ja simulointimallit. (Yang 2009)

7.2.1 Suunnittelukatselmuksien ja tarkastelumenetelmät

Nämä menetelmät sisältävät esimerkiksi QFD ja FMEA työkalut sekä muodolliset suunnittelukatselmuksien. Kaikki nämä menetelmät tuottavat selkeästi määriteltyjä toimintamalleja ja mallipohjia. Ne voivat systemaattisesti ohjata ryhmän jäseniä tarkastelemaan nykyistä tuotetta yksityiskohtaisesti vahvuuksien ja heikkouksien määrittämiseksi. Suunnittelukatselmuksien ja tarkastusmenetelmät ovat systeemikeskeisempiä, kattavampia ja subjektiivisempiä kuin muut tuotemallin analysointimenetelmät ja pelkäävät niitä käyttäen voidaan vain harvoin tuottaa kokonaisvaltaista validointia. (Yang 2009)

7.2.2 Matemaattiset mallit

Tuotemallin analysoimiseen käytetään yleensä sellaisia matemaattisia malleja kuten mekaanisen rakenteen jännitysten tai venymien laskentamallit, sähköjännityksen tai virran laskentamallit, loogiset matemaattiset mallit, kustannuslaskentamallit jne. Laskentaan käytetään usein matemaattisia ja tilastollisia ohjelmistoja kuten Mathematica, Microsoft Excel, MathCad, optimointi ohjelmistot ja MINITAB. (Yang 2009)

Näiden menetelmien avulla voidaan mallintaa ja analysoida melko monimutkaisiakin ilmiöitä ja joidenkin sovellusten validoimiseen näillä päästään tyydyttävään tarkkuuteen. Monimutkaisemmissa tapauksissa kuten käyttöympäristö- tai luotettavuusvaatimusten validoinnin kohdalla tarvitaan usein näiden lisäksi tietokoneavusteisen virtuaalitestauksen ja simulointimallien avulla tehtäviä analysejä. (Yang 2009)

7.2.3 Tietokoneavusteinen virtuaalitestaus ja simulointi

Tietokoneavusteista virtuaalitestausta ja simulointia voidaan nykyään käyttää useiden eri sovellusten analysoimiseksi. Mekanismpohjaiset simulointimallit ovat yleensä kaukallisia tietokoneohjelmistoja ja ohjelmistosta riippuen ne on kehitetty tietyn sovellusalueen kuten mekaniikkasuunnittelun, sähkösuunnittelun tai elektroniikkasuunnittelun ilmiöiden analysoimiseen. Yleisimmin käytettyjä mekanismpohjaisia simulointimalleja ovat mekaniikkasimulointi, sähkö- ja elektroniikkasimulointi sekä monet muut simulointimallit kuten finanssitoiminnan ja taloustieteen simulointimallit. (Yang 2009)

Komponenttien ja systeemien mekaniikkasuunnittelu tehdään yleensä CAD (computer-aided design) ohjelmistolla, jonka avulla tuotettuja malleja voidaan pitää lähtöpisteenä CAE (computer-aided engineering) analyysien kuten jännitys- ja värähtelyanalyysien tekemiselle. FEA (finite element analysis) on tietokonepohjainen laskentateknikka, jolla voidaan arvioida esimerkiksi mekaanisten tekijöiden kuten voimien, muodonmuutosten ja materiaaliominaisuuksien vaikutussuhdetta kappaleen rasitukseen ja lujuuteen. Kaasujen ja nesteiden virtauksen ja muiden ominaisuuksien analysointiin käytettävää FEA menetelmää kutsutaan CFD (computational fluid dynamics) analyysiksi. CFD ohjelmistoa voidaan käyttää esimerkiksi ajoneuvon moottorin sisäisten virtausten tai jäähdytysjärjestelmän virtausten analysointiin. (Yang 2009)

Sähkö- ja elektroniikkapiirien analysointiin voidaan käyttää EDA (electrical design automation) ohjelmistoa, joka perustuu sähkösuunnittelun mekanismimalleihin kuten Ohmin lakiin ja loogisiin piirikaaviomalleihin. EDA ohjelmistolla voidaan suorittaa monia analyysejä kuten piirikaavion suorituskykyanalyysejä ja herkkyysanalyysejä. (Yang 2009)

Älykkäiden mekatronisten järjestelmien, jotka integroivat mekaaniset ja elektroniset komponentit sekä ohjelmiston, on monimutkainen kehittämis- ja suunnittelutehtävä. Ohjausjärjestelmä ja mekaaniset komponentit muodostavat yhdessä limittäisen systeemin, jonka osia ei voida suunnitella täysin erillään. Mekatronisen järjestelmän tapauksessa ohjausjärjestelmän toiminta ja systeemit tulee suunnitella, verifioida ja validoida yhdessä ja mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tuotekehityssykliä. Virtuaalitestaus yhdessä analyttisen simuloinnin kanssa mahdollistaa edellä mainitun etupainotteisen validointitoiminnan suorittamisen. (Siemens 2014) Systeemisimulointityökalujen, kuten LMS Amesim ja GT-SUITE – ohjelmistot, avulla voidaan (Siemens 2014):

- analysoida mekatronisen järjestelmän toiminnallista suorituskykyä varhaisesta kehitysvaiheesta lähtien
- optimoida mekaniikka-, hydraulikka-, pneumatiikka-, lämmönsiirto-, sähkö- ja elektroniikkasysteemien monimutkaista vuorovaikutusta paljon ennen kuin ensimmäinen fyysinen prototyyppi on käytettävissä
- proaktiivisesti suunnitella kriittisiä toimintoja ja parantaa koko tuotteen suorituskykyä ja laatua

- välttää suunnitteluvirheitä, tutkia innovatiivisia suunnitteluvaihtoehtoja ja nopeuttaa tuotekehitysprosessia

7.3 Validointitestausta

Validointitestausta on tärkeä osa suunnitteluprosessia ja sen avulla on tarkoitus varmistaa, että suunniteltu tuote vastaa asetettuja suunnitteluvaatimuksia. Kaikki validointitestit suunnitellaan jonkin tietyn suunnitteluvaatimuksen kuten toiminnallisen suorituskykyvaatimuksen tai luotettavuusvaatimuksen validoimiseksi. Validointitestausta voidaan jakaa karkeasti alla kuvattuihin tyyppeihin:

Toiminnallinen testaus (functional testing)

Toiminnallisen testauksen tavoitteena on validoida asetettujen *toiminnallisten suorituskykyvaatimusten* täyttymistä. Monien tuotteiden kohdalla toiminnallinen testaus voidaan ainakin osittain suorittaa tuotemallin analysointimenetelmien kuten virtuaalitestauksen ja simuloinnin avulla. Jos simulointimallit ovat riittävän tarkalla tasolla, niin niiden avulla voidaan melko luotettavasti ennustaa tuotteen käyttäytymistä ja simulointitulokset toimivat monissa tapauksissa toiminnallisena testinä. Näin voidaan oleellisesti pienentää todellisilla laitteilla tehtävien toiminnallisten testien määrää. Jotta voidaan varmistua siitä, että simulointimallit ovat riittävän tarkalla tasolla, niin simulointimallit tulee verifioida vastaavasti todellisen testin avulla (Yang 2009).

Luotettavuustestausta (reliability testing)

Luotettavuustestauksen tavoitteena on validoida asetettujen *luotettavuusvaatimusten* täyttymistä. Luotettavuustestauksen menetelmiin kuuluu kestoikätestaus ja suorituskykytestaus. Kestoikätestauksella halutaan selvittää, että täyttääkö tuote tai komponentti sille asetetun kestoikävaatimuksen. Suorituskykytestauksella halutaan selvittää systeemin suorituskyvyn alenemisen taso tuotteen käyttöiän aikana.

Kestoikään liittyvien luotettavuusvaatimusten testaamiseen käytetään usein nopeutettua testausta, koska tuotteen testaamiseen ei useinkaan voida käyttää suunniteltua kestoikää vastaavaa aikaa. Esimerkiksi, jos tuotteen suunniteltu kestoikä on kymmenen vuotta, niin validointitestaukseen ei voida käyttää kymmentä vuotta vaan on käytettävä nopeutettua testausta. Mekaanisten tuotteiden kohdalla vikaantumisen syynä on yleensä kuormitus, väsyminen, viruminen, värähtely, lämpötila, kuluminen, korroosio ja materiaalivirhe. Sähkö- tai elektroniikkatuotteissa vikaantumisen aiheuttaa usein sähköinen kuormitus kuten, virta, jännitys, teho tai liitoksen vikaantuminen. Ohjelmistotuotteiden vikaantumisen syynä on useimmiten suunnitteluvirhe tai ohjelmointivirhe eli bugi (Yang 2009).

HALT (highly accelerated life testing) on yleisesti käytetty testityyppi luotettavuustestauksessa. HALT testissä kuormitustaso on paljon korkeampi kuin todellisessa käytötilanteessa ja näin testausaikaa saadaan oleellisesti lyhennettyä. HALT testin spesifi-

kaatio tulee olla tarkoin määritelty ja testinaikainen seuranta on tehtävä huolella, jotta vikaantumismekanismi saadaan selville ja analysoitua tuoteparannuksia varten (Yang 2009).

Koska tuotemallin analysoinnilla tuotettu informaatio on rajallinen luotettavuusvaatimusten validoinnin kannalta ja kaikkia vikaantumismekanismeja ei tunneta, niin todellisen tuotteen tai prototyypin testaaminen on erittäin tärkeää (Yang 2009).

Turvallisuus- ja vaatimuksenmukaisuustestaus (safety and regulation-related testing)

Turvallisuus- ja vaatimustenmukaisuustestauksen tavoitteena on validoida/verifioida asetettujen turvallisuusvaatimusten ja viranomaisvaatimusten täyttymistä. Viranomaisvaatimukset perustuvat yleensä eri maiden lakeihin ja direktiiveihin ja ne ohjaavat hyvin paljon tämän tyyppistä testausta (Yang 2009).

Variaatiotestaus (testing for variation)

Variaatiotestauksen tavoitteena on validoida/verifioida systeemin toiminnallisten suorituskykyvaatimusten täyttymistä erilaisissa käyttöympäristöissä, erilaisissa käyttötavoissa ja muun tyyppisissä variaatioissa. Yangin (2009) mukaan Taguchi menetelmä sopii täydellisesti tämän tyyppiseen testaamiseen.

Rajapinta- ja yhteensopivuustestaus (testing for interface and compatibility)

Rajapinta- ja yhteensopivuustestauksen tavoitteena on validoida tuotteen toimivuutta ja käyttöä yhdessä toisten systeemien kanssa. Näiden vaatimusten testaamiseen käytetään prototyyppejä tai valmiita tuotteita (Yang 2009).

Validointitestausstrategia (validation testing strategy)

Validointitestausstrategian avulla kuvataan kuinka validointitestaus kokonaisuudessaan jaetaan osatehtäviin siten, että ne ovat hyvin hallittavissa. Jos osatehtävistä mahdollisimman moni voitaisiin suorittaa ajallisesti rinnakkain, niin *suunnittelun validoinnin* sykliäikaa saadaan lyhennettyä huomattavasti (Yang 2009).

Systeemi-, alisysteemi- ja komponenttitestaus (system, subsystem and components testing)

Jos tuote voidaan jakaa useampaan alisysteemiin, niin alisysteemit voidaan yleensä jakaa edelleen pienempiin kokonaisuuksiin aina komponenttitasolle saakka. Näin tuotetta voidaan testata tekemällä pienempiä testejä systeemin eri tasoilla. Esimerkiksi tekemällä useita pieniä ja edullisia komponenttitestejä samanaikaisesti voidaan ongelmat selvittää tehokkaasti komponenttitasolla. Kun kaikki alisysteemin komponentit on validoitu, voidaan suorittaa alisysteemin testaus ja lopulta suorittaa koko systeemin validointitestaus. Tässä lähestymistavassa tulee huomata, että kaikkia komponentteja ei tarvitse tutkia yhtä perusteellisesti vaan testauksen painopiste tulee olla uuden teknologian tai tuotemallin testauksessa. Hyvin tunnettuja komponentteja, joiden osalta tietoa löytyy hyvin tietämuskannasta, ei tarvitse välttämättä testata lainkaan (Yang 2009).

Materiaalitestaus (materials testing)

Materiaalitestauksessa tarvitaan tilanteissa, jossa materiaalin ominaisuuksista ei ole riittävän tarkkaa tietoa ja sitä voidaan pitää komponentin tai systeemin kannalta yhtenä merkittävimmistä tuntemattomista tekijöistä (Yang 2009).

Uuden teknologian testaus (new technology testing)

Jos tuotteessa käytetään uutta teknologiaa, niin on hyvin tärkeää suorittaa laaja tuotemallin analyysi ja validointitestaus. Taguchi-menetelmän käyttö ja luotettavuustestaus ovat hyviä työkaluja uuden teknologian testaukseen.

Validointitoiminnan suunnittelu (validation activity planning)

Suunnittelun validoinnin keskeisin tavoite on varmistaa, että uusi tuote täyttää sille asetetut *suunnitteluvaatimukset* (design requirements). Pääasialliset suunnittelun validoinnin työkalut ovat *tuotemallin analysointi* ja *validointitestaus*. Yangin (2009) mukaan hyvän validointikäytännön tulee saavuttaa seuraavat tavoitteet:

1. Kaikki suunnitteluvaatimukset on validoitu riittävällä tasolla.
2. Suunnittelun validoinnin kokonaiskustannukset ovat alhaiset.
3. Suunnittelun validoinnin sykli-aika on lyhyt.

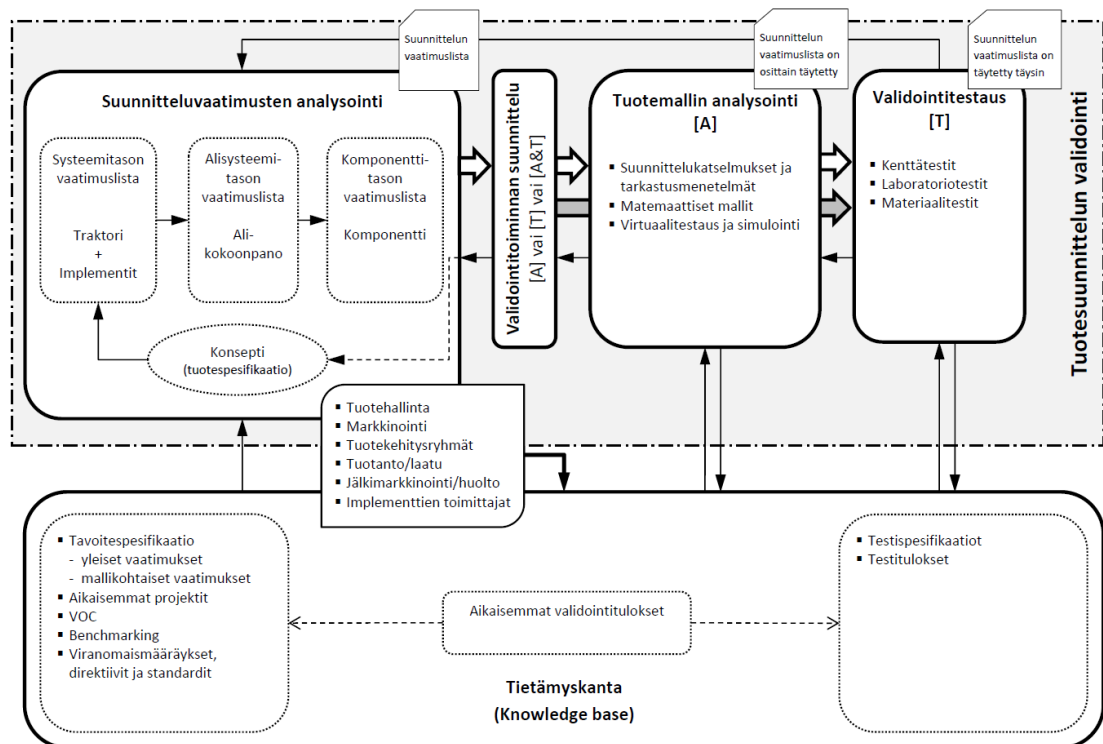
Validointitoiminnan kustannukset ja sykli-aika ovat riippuvaisia seuraavista tekijöistä:

- tuotemallin analysointi vs. validointitestaus
 - testaus on yleensä kalliimpaa
- prototyyppien valmistaminen
 - on usein melko kallista
- testauksen tyyppi
- testeihin käytettävä aika
- testauksen otoskoko
- yksittäisten testien suorittamisjärjestys
 - voidaanko testaus tehdä rinnakkain vai ovatko yksittäiset testit riippuvaisia toisistaan?

Näin ollen suunnittelun validointitoiminta tulisi suunnitella huolella, jotta saavutetaan optimaalinen tehokkuus, sykli-aika ja alhaiset kokonaiskustannukset.

8 TRAKTORIN TUOTESUUNNITTELUN VALIDOINTIPROSESSI

Edellä kuvattuja tuotesuunnittelun validoinnin vaiheita ja työkaluja voidaan soveltaa hyvin traktorin tuotekehityksessä yhdessä AMPIP2.1-prosessin kanssa. Näitä periaatteita noudattaen traktorin tuotesuunnittelun validointi on mahdollista suorittaa systemaattisesti ja sen tueksi on luotu traktorin tuotesuunnittelun validoinnin prosessikaavio, joka on esitetty kuvassa 8.1 ja, jonka suurennos on liitteessä 1.



Kuva 8.1. Traktorin tuotesuunnittelun validoinnin prosessikaavio.

Koska traktori omaa tuotteena hyvin pitkän historian, sen kehitykseen liittyvät tuotekehitysprojektit ovat luonteeltaan usein tuoteparannusprojekteja ja täysin uuden traktormallin kehitysprojekteja toteutetaan huomattavasti harvemmin. Osin pitkästä historiasta johtuen tietämyskanta sisältää paljon arvokasta tietoa, jota käytetään pohjana uusissa kehitysprojekteissa. Impulssi tuotekehitysprojektin käynnistämiseen tulee tuotehallinnalta, joka esittää kehitettävän tuotteen ylatason konseptin, johon on kirjattuna muun muassa tuotteen yleinen tarkoitus, markkina-asema, arvolupaus sekä tuoreimmat asiakastarpeet. Uuden traktorimallin konsepti ja tuotespesifikaatio kehitetään tietämyskan-

nassa olevan tavoitespesifikaation pohjalta, mikä sisältää traktorille asetetut yleiset ja mallikohtaiset vaatimukset. Tämän lisäksi on otettava huomioon aikaisemmista projekteista kerätyt kokemukset, viimeisimmät asiakkaiden vaatimukset (VOC), kilpailija-analyytit, nykyiset ja tulevat viranomaismääräykset ja niin edelleen. Kehitettävän tuotteen konseptia ja tuotespesifikaatiota kehitetään edelleen tuotekehitysprosessin aikana ja siinä tuotesuunnittelun validointi on hyvin tärkeässä roolissa.

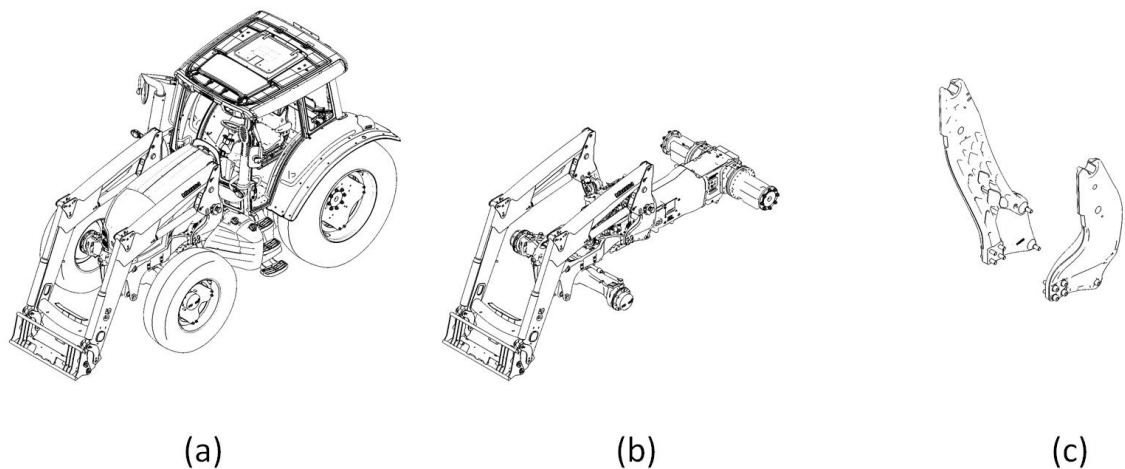
Suunnitteluvaatimusten analysointi käynnistetään systeemitason suunnittelun vaatimuslistan luomisella, jossa kehitettävän tuotteen tuotespesifikaatio on avain asemassa. Seuraavaksi luodaan tarvittavat vaatimuslistat alisysteemi ja komponenttitasoille, mitkä voidaan johtaa ideaalitulanteessa suoraa systeemitason vaatimuslistasta edellyttäen, että se on riittävän tarkasti määritelty. Jos systeemitason vaatimuslistassa on puutteita, tarvittavat lisätiedot on hankittava tapauskohtaisesti tietämuskannasta, tuotehallinnasta, markkinoinnista, tuotekehitysryhmiltä, tuotanto/laatuorganisaatiosta, jälkimarkkinointi/huolto-organisaatiosta tai implementtien toimittajilta. Implementtien toimittajia ovat esimerkiksi etukuormaimen tai paalaimen toimittajat.

Seuraavassa vaiheessa suoritetaan validointitoiminnan suunnittelu, jolloin tehdään validointisuunnitelmat systeemitasolle sekä alisysteemi- ja komponenttitasoille. Validointisuunnitelman mukaisesti validoinnin tehtävät suoritetaan tuotemallin analysointi- ja validoititestaustyökalujen avulla. Tapauksesta riippuen validointitehtävä voidaan suorittaa pelkästään joko tuotemallin analysoinnin tai validointitestauksen avulla, mutta usein tarvitaan molempia työkaluja. Tuotekehitys on iteratiivinen prosessi ja suunnittelun vaatimuslistan täyttäminen täysin vaatii yleensä useita vaatimus-analysointi-testaus – iteraatiokierroksia, jonka seurauksena myös konseptin tuotespesifikaatiota päivitetään.

On erittäin tärkeää, että validoinnissa syntynyt uusi tieto tallennetaan tietämuskantaan, jotta se on nopeasti käytettävissä seuraavissa projekteissa.

9 ESIMERKKITAPAUS: RUNKOSOVITTEEN TUOTESUUNNITTELUN VALIDOINTI

Esimerkkitapauksessa käsitellään uuden traktorimallin tuotekehitysprosessia tuotesuunnittelun validoinnin näkökulmasta. Tuotesuunnittelun validointia tarkastellaan komponenttitasolla ja tarkasteltava osa on *runkosovite*, jonka avulla etukuormain kytketään traktoriin. Etukuormaimen kytkemiseen tarvitaan kaksi runkosovitetta, joista toinen on vasemmalla ja toinen oikealla puolella traktoria ja ne ovat symmetrisiä keskenään. Kuvassa 9.1 on esitetty traktorin eli teknisen systeemin eri tasot runkosovitteiden näkökulmasta tarkasteltuna. Systeemitasona toimii siis kokonainen traktori, johon on asennettu etukuormain ja runkosovitteet kuten kuvassa 9.1a. Alisysteemitaso kuvassa 9.1b sisältää etukuormaimen ja runkosovitteiden lisäksi traktorin runkorakenteen ja etukuormaimen hydraulipiirin sekä sen ohjausjärjestelmän. Komponenttitaso sisältää vasemman ja oikean puoleiset runkosovitteet, jotka on esitetty kuvassa 9.1c.



Kuva 9.1. Systeemin eri tasot runkosovitteiden näkökulmasta tarkasteltuna. Systeemitaso (a), alisysteemitaso (b) ja komponenttitaso (c).

Tässä esimerkkitapauksessa tuotesuunnittelun validointi aloitettiin kuvan 8.1 (liite 1) prosessikaavion kohdasta *alisysteemitason vaatimuslista* eli tilanteesta, jossa suunniteltavalle tuotteelle on jo luotu tuotespesifikaatio ja konsepti on hyväksytty, minkä pohjalta on muodostettu *systeemitason vaatimuslista*. Validointi aloitettiin suunnitteluvaatimusten analysoinnilla, jonka tuloksena muodostettua *komponenttitason vaatimuslistaa* käytettiin pohjana validointisuunnitelman tekemiseen. Tämän jälkeen tehtiin validointisuunnitelman mukaiset tuotemallin analysoinnin ja validointitestauksen tehtävät. En-

simmäisessä vaiheessa suoritettiin rakenteen staattinen lujuustarkastelu, joka tehtiin Ansys FEA ohjelmalla. Lujuustarkastelun jälkeen aloitettiin rakenteen fyysinen testaaminen normaaliin testispesifikaatioon kuuluvalla runkotestillä, joka tehtiin laboratorion kuormituspenkissä. Runkosovitteiden jännitystasojen selvittämiseksi runkotestin yhteydessä käytettiin lisäksi myös venymämittausta. Laboratoriossa tehdyn testin jälkeen siirryttiin kenttätestivaiheeseen, jonka tarkoituksena oli kerätä informaatiota runkosovitteisiin kohdistuvista rasituksista eri etukuormaintyövaiheissa. Tiedon keräämiseen käytettiin venymä-, kiihtyvyyden- ja painemittausta, minkä avulla saatiin kerättyä runsaasti mittausdataa myös kestoikälaskentaa ja simulointimenetelmiä varten.

9.1 Runkosovitteen suunnitteluvaatimukset

Suunnitteluvaatimusten analysoinnin pohjana on tuoteprojektin konseptivaiheessa luotu vaatimuslista koko systeemille. Tässä yhteydessä tarkastellaan komponenttitasoa ja vaatimuslista komponenttitasolle on johdettu systeemi- ja alisysteemitason vaatimuslistoista. Kuormaimen runkosovitteen suunnitteluvaatimusten analysoimista varten on luotu liitteen 2 mukainen vaatimuslista, jossa vaatimukset on ryhmitelty luvun 7.1 mukaisesti eri vaatimusryhmiin. Vaatimukset on pisteytetty keskinäiseen tärkeysjärjestykseen ja ne on ryhmitelty kolmeen luokkaan, jotka ovat kiinteät vaatimukset, vähimmäisvaatimukset ja toivomukset (Jokinen 2001):

- kiinteä vaatimus
 - Ratkaisun on ehdottomasti täytettävä nämä vaatimukset (esim. kuormitettavuus, yhteensopivuus jne.).
- vähimmäisvaatimus
 - Näillä vaatimuksilla on raja-arvo, joka on saavutettava ja jonka ylittäminen tai alittaminen on toivottavaa (esim. käyttölämpötila-alue, melutason yläraja jne.).
- toivomus
 - Toivomukset otetaan huomioon mahdollisuuksien mukaan ja niiden täyttäminen saa aiheuttaa rajoitetun lisäkustannuksen.

Vaatimuslistassa asetettujen vaatimusten täytyminen varmistetaan tuotemallin analysoinnin ja validointitestauksen työkalujen avulla validointitoiminnan suunnittelussa määritellyllä tavalla.

9.2 Validointisuunnitelma

Tuotesuunnittelun validointisuunnitelma muodostuu liitteenä 2 olevan vaatimuslistan Validointi-sarakkeen pohjalta. Validointi-sarake määrittelee sen käytetäänkö vaatimuksen validointiin tuotemallin analysointia (A) vai validointitestausta (T) vai molempia (A&T). Sarakkeissa *Tuotemallin analysointimenetelmät* ja *Validointitestausten menetelmät* on listattu työkalut, joita validoinnissa on tarkoitus käyttää. Alla olevien otsikoiden alta löytyy tarkempi kuvaus validointiin käytettävistä työkaluista.

Toiminnallisen suorituskyvyn vaatimukset

Validointiin käytetään CAD/CAE – työkaluja ja menetelmiä kuten 3D-mallin analysointia ja simulointia sekä suunnittelukatselmuksia.

Käyttöympäristön asettamat vaatimukset

B.4 kohdan vaatimusta lukuun ottamatta nämä liittyvät runkosovitteen tapauksessa pääasiassa kappaleen materiaaliominaisuuksiin ja ne tulee huomioitua jo suunnitteluprosessin aikana, jolloin käytetään hyväksi tietämyskannan informaatiota eikä niitä ei tarvitse myöhemmin validoida. B.4 kohdan validointiin käytetään CAD/CAE – työkaluja ja menetelmiä sekä suunnittelukatselmuksia sekä prototyypin kenttätestauksen aikana tehtyjä havaintoja.

Luotettavuusvaatimukset

Nämä ovat kiinteitä vaatimuksia ja ne tulee ehdottomasti täyttää. Validointiin käytetään tuotemallin analysointimenetelmiä kuten matemaattisia kestoikälaskentamalleja, CAD/CAE – työkaluja ja menetelmiä kuten staattista rakennelaskentaa (FEA) ja monikappalesimulointia (MBS) sekä validointitestausten menetelmiä kuten prototyypin laboratorio- ja kenttätestausta.

Käyttövaatimukset

Käyttövaatimukset liittyvät rakenteen lujuusteknisiin ominaisuuksiin ja validointiin käytetään samoja menetelmiä kuin luotettavuusvaatimusten validoinnissa.

Turvallisuusvaatimukset

Nämä ovat vaatimuksia, jotka pohjautuvat viranomais määräyksiin ja standardeihin ja niiden validointi suoritetaan koko traktorin suunnittelukatselmusten yhteydessä ja riippumattomien tarkastuslaitoksien kuten MTT:n tekemissä tarkastuksissa. Myös luotettavuus- ja käyttövaatimusten validointituloksia voidaan käyttää tietojen täydentämiseen.

”Kaikkien maatalous- ja metsäkoneiden pitää täyttää EU:n koneturvallisuusdirektiivissä, ”konedirektiivi” (2006/42/EY), määritellyt terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Tarkastusperusteina käytetään, maatalouskoneiden yleiset turvallisuusvaatimukset sisältävää standardia SFS-EN ISO 4254-1, konekohtaisia SFS-EN-standardeja sekä yleisiä EN-koneturvallisuusstandardeja” (MTT 2014).

Rajapinta- ja yhteensopivuusvaatimukset

Nämä vaatimukset tulee täytyä heti suunnittelun alkuvaiheessa ja ne ovat osa suunnittelun lähtötietoja. Validointiin käytetään CAD/CAE – työkaluja ja menetelmiä sekä prototyypivaiheen suunnittelukatselmuksia.

Huollettavuusvaatimukset

Runkosovitteisiin ei itsessään liity mitään huoltotoimenpiteitä, mutta ne eivät saa myöskään merkittävästi haitata traktoriin tehtävien huoltotoimenpiteiden suorittamista ja huoltotoimenpiteiden tekeminen tulee olla mahdollista ilman runkosovitteiden irrottamista. Validointiin käytetään CAD/CAE – työkaluja ja menetelmiä sekä suunnittelukatselmuksia.

Kustannusvaatimukset

Kustannusvaatimusten validointiin käytetään matemaattisia tuotekustannusmalleja.

Lukuun ottamatta luotettavuus- ja käyttövaatimuksia sekä vaatimusta B.4 runkosovitteiden suunnittelun validointiin tarvitaan ainoastaan tuotemallin analysointimenetelmiä, mikä on validointikustannusten kannalta edullista. Luotettavuus- ja käyttövaatimusten validointiin tarvitaan sekä tuotemallin analysointi- että validointitestausten menetelmiä ja ne ovat myös keskenään riippuvaisia siten, että analysointimenetelmissä käytettävien mallien verifioimiseen tarvitaan prototyypin laboratorio- ja kenttätestausta, joiden tuloksia analysoimalla voidaan vastaavasti verifioida testispesifikaatioita.

Tarvittavat lisätiedot vaatimusten validoimiseksi

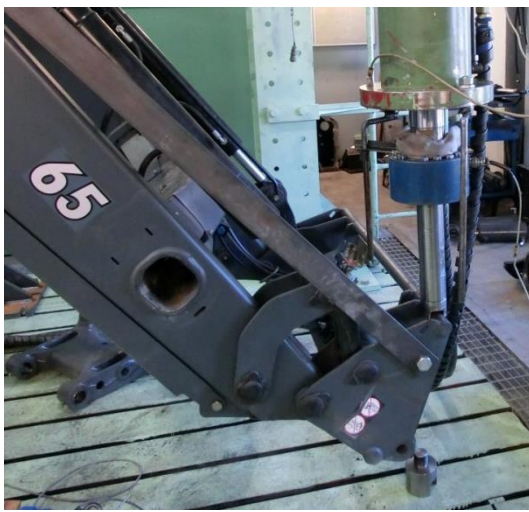
- Rakenne- ja kestoikälaskentamallien tarkentamista varten tulee hankkia lisätietoa käytössä syntyvistä rasituksista venymä- paine- ja kiihtyvyyssmittauksen avulla.
- Monikappalesimulointimallien tarkentamista varten tulee hankkia lisätietoa traktorin komponenttien hetkellisistä kiihtyvyyksistä ajon aikana.
- Kerätyn tiedon avulla voidaan osa validointitehtävistä suorittaa luotettavammin aikaisessa vaiheessa.

9.3 Runkosovitteen tuotemallin analysointi ja validointitestausta

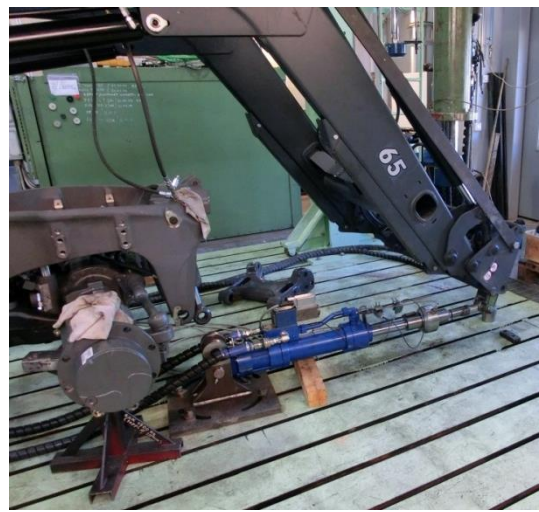
Kuormaimen runkosovitteen luotettavuus- ja käyttövaatimusten analysointi aloitettiin staattisella rakennelaskennalla, joka tehtiin Ansys FEA ohjelmistolla. FEA-laskennan geometriatiedot saatiin rakenteen 3D-mallista, joka oli tehty Catia V5 CAD ympäristössä. Seuraavassa vaiheessa testattiin runkosovitteen prototyypin kestävyyttä laboratorion kuormituspenkissä testispesifikaation mukaisilla kuormilla ja syklimäärillä. Normaalin testispesifikaation määritysten lisäksi rakenteesta haluttiin nyt mitata myös runkosovitteeseen syntyviä jännityksiä venymäliuskamittauksen avulla. Viimeisessä vaiheessa runkosovitteita testattiin traktorin kenttätestaustauksen yhteydessä, jolloin saatiin selville runkosovitteiden toimivuus ja informaatiota rakenteellisesta kestävyyydestä, kun traktoria käytetään todellisissa käyttöolosuhteissa. Validointisuunnitelmaan kirjattiin ylös vaatimusten validointiin tarvittavat lisätietotarpeet, joiden täyttämiseksi suoritettiin venymä- paine- ja kiihtyvyyssmittauksia traktorin kenttätestaustauksen yhteydessä sekä ISO-smooth testiradalla suoritetuissa testeissä. Systemitason eli koko traktorin kenttätestejä tehdään prototyypeillä AMPIP2.1 tuotekehitysprosessin vaiheissa 3, 4 ja 5, jolloin niitä testataan hyvin erilaisissa olosuhteissa ja työtehtävissä. Prototyypin kenttätesteistä kertyy yhteensä tuhansia käyttötunteja, jolloin lähes kaikki viat ja vaurioitumiset tulevat esiin ennen tuotantovaihetta. Tämän tutkimuksen yhteydessä kenttätestaukseen käytettävissä oleva aika oli hyvin rajallinen, joten kestoajan arvioimiseen käytettiin laboratoriossa tehdyn runkotestin tuloksia, kenttätestissä kerättyä venymämittaustietoa ja kerättyyn dataan pohjautuvaa matemaattista kestoikälaskentaa.

9.3.1 Laboratoriotestaus

Runkosovitteen laboratoriotestaus on osa traktorin runkorakenteen nykyistä kestotestiä, joka suoritetaan kuormittamalla rakennetta hydraulisyylinterin avulla vakioamplitudisella kuormalla kuormitussyylinterin voimaa portaittain nostaen. Runkotestissä on useita vaiheita ja kahdessa niistä testataan runkorakenteen kestävyyttä etukuormaimen käytöstä syntyvien kuormitusten alaisuudessa. Runkotestin spesifikaatiossa on etukuormaimelle määritelty kaksi testivaihetta ”PHASE 5.1 FRONT LOADER LOAD 1 / LIFTING” ja ”PHASE 5.2 FRONT LOADER LOAD 2 / PUSHING” eli kuorman nostoa ja kauhan puskua vastaavat kuormitussuunnat. Nostotestissä (phase 5.1) kuormitussyylinteri on paikoitettu kuvan 9.2 mukaisesti kauhan oikean puoleiseen kiinnityspisteeseen ja pusku- testissä (phase 5.2) kuvan 9.3 mukaisesti.



Kuva 9.2. Kuormituspiste nostotestissä.



Kuva 9.3. Kuormituspiste pusku- testissä.

Runkotestin vaihe 5.1 eli nostotesti aloitettiin kuormitusprofiilitaulukon ensimmäisen sekvenssin mukaisella kuormituksella, joka määrittää kuormitussyylinterin voiman vaihteluvälinä. Testin tavoitteena oli suorittaa kuormitussekvenssit testispesifikaatiossa olevan taulukon mukaisessa järjestyksessä ensimmäisestä sekvenssistä viimeiseen, jonka jälkeen voidaan siirtyä vaiheeseen 5.2 ellei rakenteessa tapahdu rikkoontumista.

Rakenteessa ei havaittu vaurioita nostotestin viimeisen sekvenssin jälkeen ja testiä jatkettiin spesifikaation mukaisesti vaiheeseen 5.2 eli pusku- testi. Pusku- testissä käytetyt kuormitussyylinterin voimat ja syklimäärät oli myös taulukoitu testispesifikaatioon.

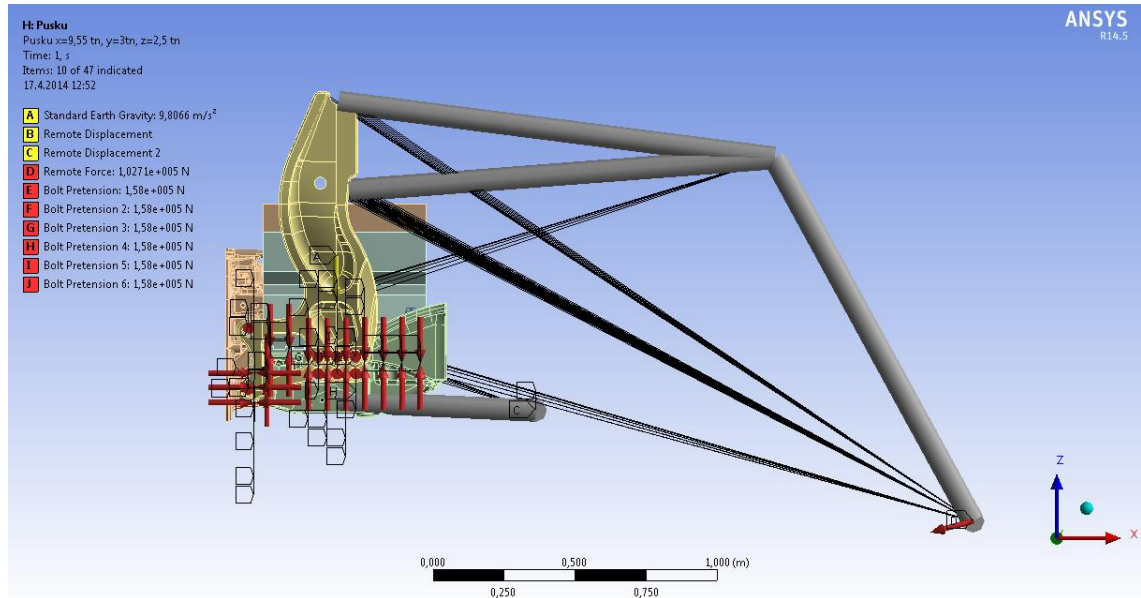
Validointisuunnitelman mukaiset venymämittaukset suoritettiin runkotestin yhteydessä. Traktorin runkorakenteessa, runkosovite mukaan luettuna, ei kuitenkaan havaittu vikaantumisen merkkejä ja rakenteen todettiin läpäisseen kyseisen testin.

Venymäliuskamittaus ja tulokset

Venymäliuskamittauksen ensisijainen tavoite oli hankkia validointisuunnitelmassa vaadittua lisätietoa rakennelaskentaa varten mittaamalla rasituksia kuvan 9.3 mukaisessa puskuormitustilanteessa sekä verrata mittaustuloksia FEA-laskennan tuloksiin. Puskuormitustilanteen lisäksi mittauksia päätettiin tehdä sekä kuvan 9.2 mukaisella toispuoleisella että keskeisellä pystysuuntaisella kuormituksella, mikä osoittautui mittaustulosten luotettavuutta arvioitaessa arvokkaaksi tiedoksi.

Venymämittaukset suoritettiin siten, että rakennetta kuormitettiin runkotestin spesifikaation mukaisilla kuormitussylinterin maksimivoimilla staattisesti kuormitusta ensin portaittain nostaen ja sen jälkeen laskien. Kuormitussuunta oli runkotestin vaiheen 5.2 (puskutesti) sekä kuvien 9.3 ja 9.5 mukainen. Venymämittaukset tehtiin käyttämällä Kyowa KFG-2-120-D17-11L1M2S mallin venymäliuskarusetteja sekä HBM QuantumX – sarjan tiedonkeruulaitetta. Käytetyt venymäliuskarusetit olivat kolmielementtisiä $0^\circ/90^\circ/45^\circ$ -tyypin rusetteja. Tyypin asteluvut merkitsevät elementtien suuntakulmia toisiinsa nähden, jonka ansiosta mitattujen venymien perusteella voitiin laskea mittauspisteen pääjännitykset ($\sigma_I, \sigma_{II}, \tau_{\max}; \sigma_I > \sigma_{II}$) sekä pääsuunta.

Tiukasta testiaikataulusta johtuen venymäliuskojen paikoitus jouduttiin tekemään ajan säästämiseksi kuvan 9.4 mukaisen olemassa olleen FEA-laskentamallin avulla, jonka oletettiin vastaavan riittävällä tarkkuudella laboratorioissa ollutta kuvan 9.5 testikonstruktiota.

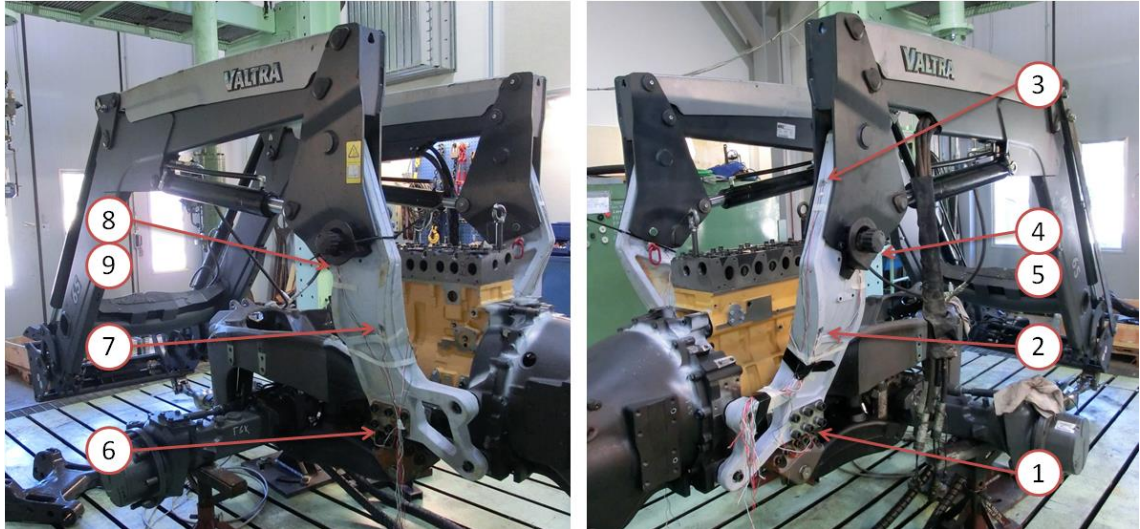


Kuva 9.4. Venymäliuskojen paikoitukseen käytetty FEA-laskentamalli.



Kuva 9.5. Laboratoriossa oleva testikonstruktiio.

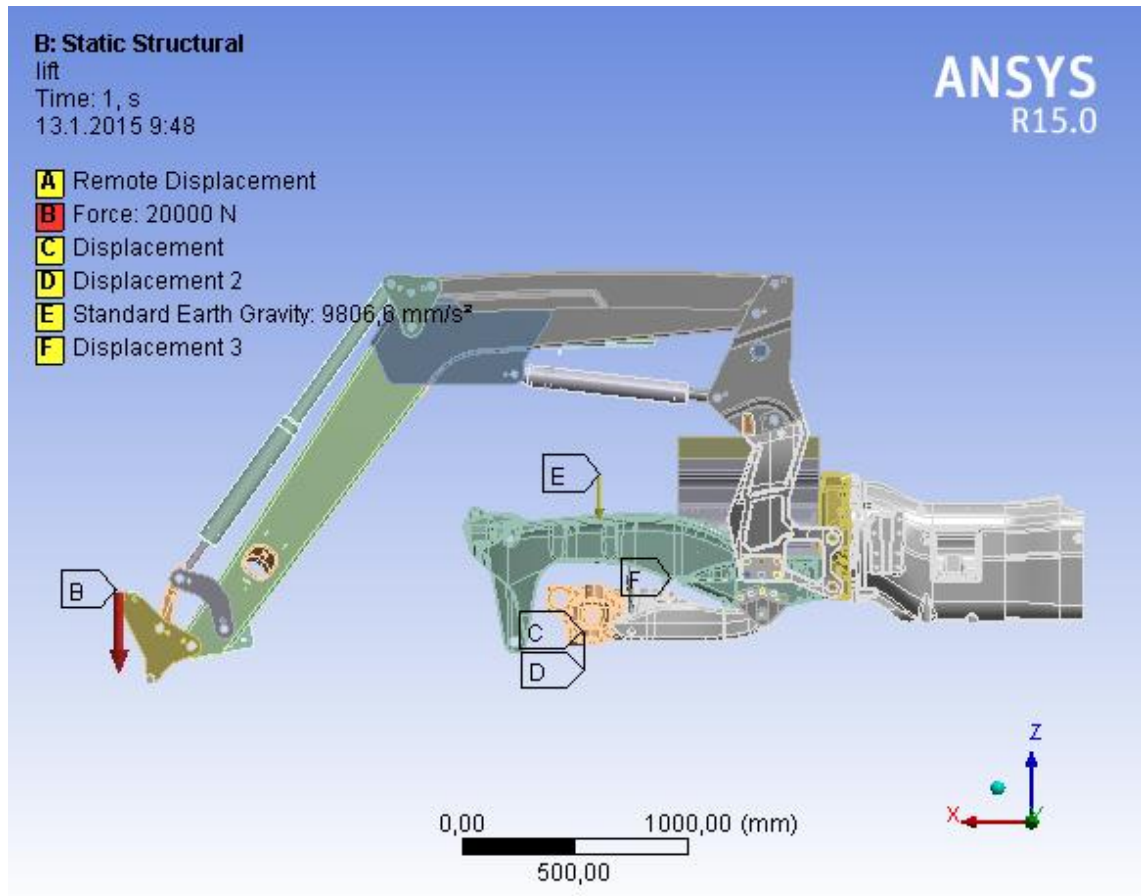
Käytettävissä olevat yhdeksän venymäliuskarusetta (lyhyemmin venymäliuska) paikoi-
tettiin jännitysten kannalta kriittisiin kohtiin kuvan 9.6 mukaisesti, joiden selvittämisek-
si käytettiin FEA-laskennassa analysoituja maksimi pääjännityksiä. Venymämittausta-
dan analysoinnin perusteella voitiin todeta, että venymäliuskojen asennus onnistui hyvin
ja kerättyä mittaustietoa voitiin pitää luotettavana.



Kuva 9.6. Venymäliuskojen paikat laboratoriotestissä. Venymäliuskat positioissa #1 ja #6 on kiinnitetty öljypohjaan ja muut on kiinnitetty runkosovitteisiin. Positiot #4 ja #8 ovat runkosovitteen ulkosivulla ja #5 ja #9 ovat sisäisivulla. Venymäliuskat on paikoitet-
tu symmetrisesti traktorin rungon keskilinjan suhteen positiota #3 lukuun ottamatta.

Koska venymäliuskojen paikoittamiseen käytetyssä FEA-laskentamallissa havaittiin merkittäviä puutteita, laskentamallia päätettiin muokata vastaamaan paremmin laborato-
rion käytettyä testikonstruktiota.

Muutosten jälkeen FEA-laskentamallin avulla voitiin tarkastella rakenteeseen kohdistuvia rasituksia täsmälleen venymämittauksen mukaisissa positioissa, jolloin laskentatuloksia voitiin verrata suoraan mittaustuloksiin. Kuvakaappaus päivitetystä laskentamallista on esitetty kuvassa 9.7.



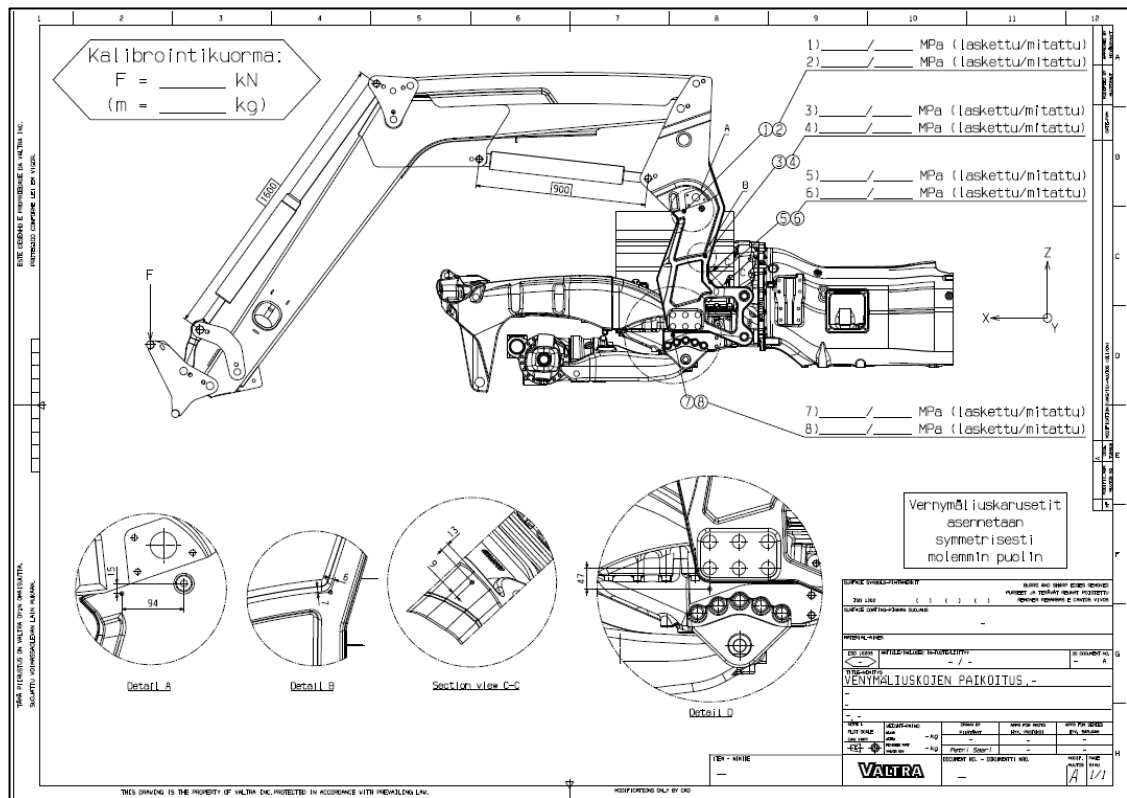
Kuva 9.7. Päivitetty FEA-laskentamalli.

Seuraavaksi verrattiin laboratoriotestin ja FEA laskennan tuloksia toisiinsa ja tarkasteltiin niiden välisiä eroja eri positioissa. Tuloksia vertaamalla havaittiin, että FEA-laskentamalli ei ollut vielä riittävän tarkka, jotta sen avulla voitaisiin luotettavasti analysoida etukuormaimen käytöstä aiheutuvia rasituksia. Todettiin, että laskentamallin kehitystä tulisi jatkaa jälleen kenttätestien suorittamisen jälkeen.

9.3.2 Kenttätestaus

Validointisuunnitelmaan kirjattuja tarvittavia lisätietoja rakenne- ja kestoikälaskentamallien sekä monikappalesimulointimallien tarkentamista varten päätettiin hankkia laboratoriotestin lisäksi traktorilla tehtävien kenttätestien avulla. Monikappalesimulointia varten päätettiin hankkia lisätietoa traktorin komponenttien hetkellisistä kiihtyvyyksistä testiradalla suoritettavan ajon aikana. Rakenne- ja kestoikälaskentaa varten hankittiin tietoa käytössä syntyvistä rasituksista venymä- paine- ja kiihtyvyyksittauksen avulla ja etukuormaimella suoritettavaksi työksi valittiin hiekan kuormaaminen traktorilla kasasta toiseen.

Kenttätestaus tehtiin sarjatuotannossa olevan traktorimallin prototyypillä, johon oli päivitetty tulevan mallin kuormaimen runkosovite ja sen rajapintaan liittyvät traktorin osat kuten vauhtipyörän kotelo ja öljypohja. Traktori varustettiin venymäliuskoilla, kiihtyvyyssantureilla ja paineantureilla sekä tiedonkeruulaitteella. Venymäliuskojen paikat määriteltiin FEA laskennan avulla kuvan 9.8 mukaisiin kohtiin.



Kuva 9.8. Venymäliuskojen paikoituspiirustus. Parittomat numerot ovat oikean puoleisia positiioita ja parilliset vasemman.

Venymäliuskojen asentaminen on kokeneellekin asentajalle aikaa vievää työtä ja kanavien kytkeminen tiedonkeruulaitteeseen vaatii huomattavaa tarkkuutta ja huolellisuutta. Mittalaitteiden mekaanisen asennuksen jälkeen tiedonkeruulaitteen ohjelmaan tehtävien asetusten tekeminen vie myös aikaa ja lisäksi CAN-datan lukemiseen QuantumX:lla tarvittiin hieman opetteluja ja ohjekirjan apua. Mittalaitteiden ja oheiskomponenttien

asentamiseen sekä asetusten tekemiseen kului aikaa yhteensä noin viisi työpäivää. Paineanturien ja kiihtyvyyssanturien mekaaninen asentaminen on tuotekehityksessä rutiiniluonteista työtä ja tarvittavat oheiskomponentit löytyivät suoraan omasta varastosta. Ainoastaan kiihtyvyyssantureita varten tuli tehdä välikaapelit ICP-vahvistimen ja HBM QuantumX - tiedonkeruulaitteen välille.

Värähtelyn kiihtyvyyden mittaamiseen käytettiin kahta kolmiakselista kiihtyvyyssanturia, joista toinen kiinnitettiin kuormaimen etuosaan vasemman nostopalkin sisäisivulle kuvan 9.9 mukaisesti.



Kuva 9.9. Kiihtyvyyssanturi kuormaimessa.

Toinen kiihtyvyyssanturi kiinnitettiin ohjaamon kiinnityskorvakkeeseen, joka sijaitsee edessä vasemmalla kuvan 9.10 mukaisesti.

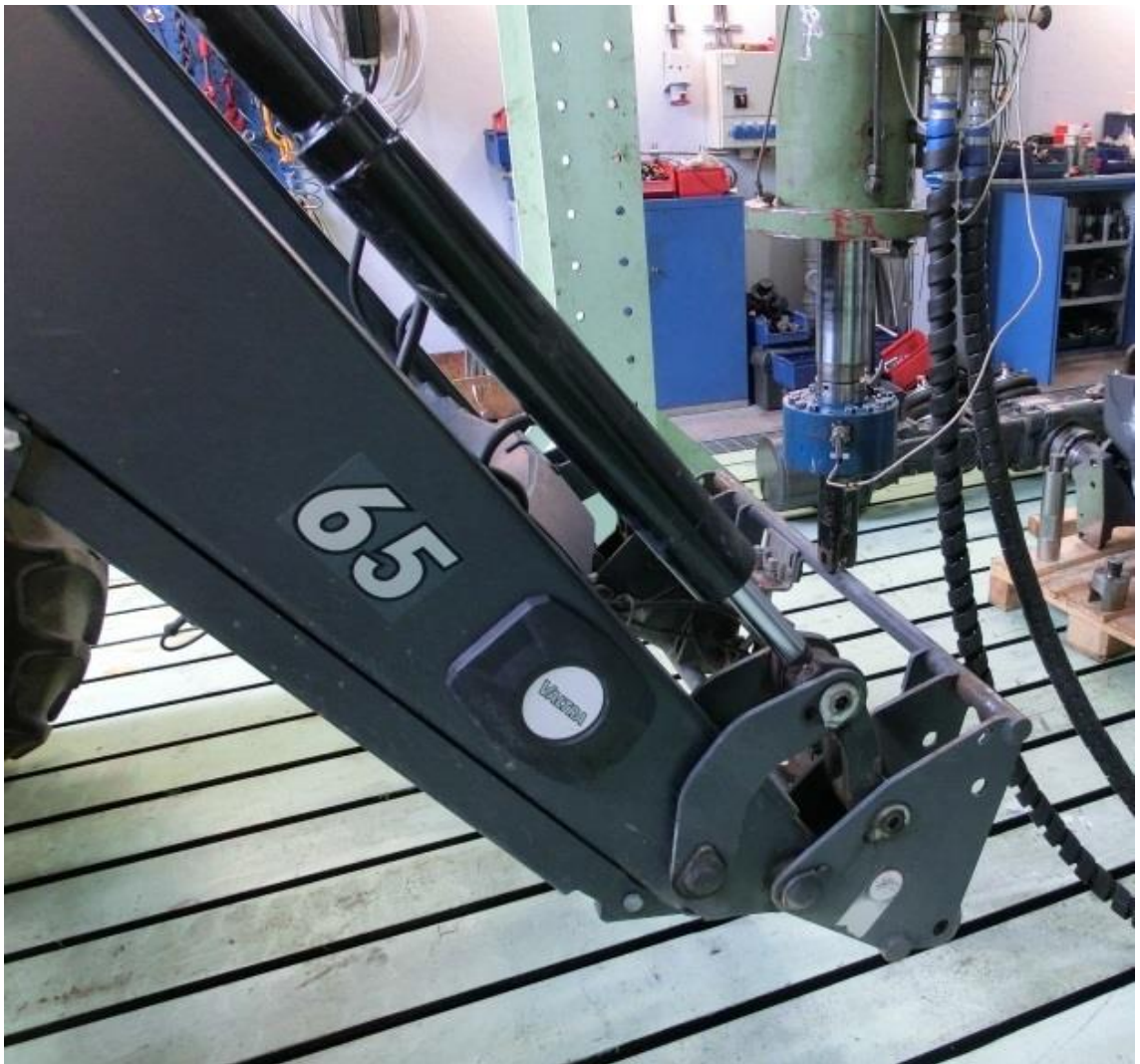


Kuva 9.10. Kiihtyvyyssanturi traktorin rungossa .

Paineanturit (2 kpl) asennettiin mittaamaan kuormaimen nostosuunnan ja kauhan kääntösuunnan täyttösuunnan mukaisia painelinjoja.

Kalibrointimittaus

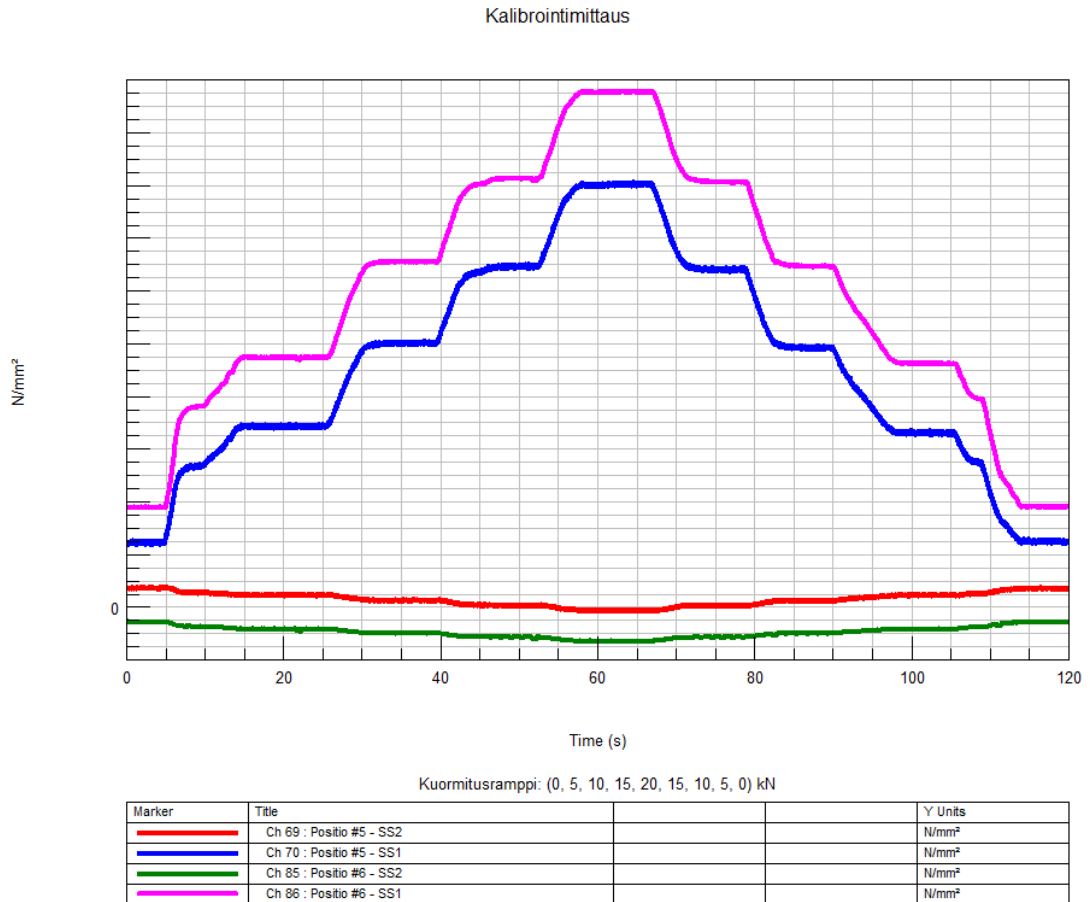
Kalibrointimittaus suoritettiin kuormittamalla etukuormainta laboratorion kuormitus- sylinteriä käyttäen traktorin keskilinjän suhteen keskeisellä kuormalla kuvan 9.11 mukaisesti. Testissä käytetyn etukuormaimen nostokapasiteetti on kuormaimen spesifikaation mukaan noin 2500 kg kalibrointimittauksen kuormitus- sylinterin paikoituskohdasta mitattuna. Kalibrointimittauksen kuormitusalueeksi valittiin 0 – 20 kN:n alue, jolloin py- syttiin turvallisesti kuormaimen maksiminostokapasiteetin alapuolella. Kuormitus tehtiin 5 kN:n portain seuraavasti: (0, 5, 10, 15, 20, 15, 10, 5, 0) kN. Etujousitus oli pois kyt- kettynä, jolloin etuakselin voimat välittyivät liikerajoittimien kautta mekaanisesti trakto- rin runkorakenteeseen.



Kuva 9.11. *Kalibrointimittaus kuormitus- sylinterin avulla tehtiin ennen kenttätestien aloittamista.*

Mittaustuloksien perusteella kaikki venymäliuskarusetit käyttäytyivät loogisesti kuormi- tuksen muutoksen mukaisesti. Kuten kuvasta 9.12 nähdään, suurin pääjännitys esiintyi positiossa #6 eli vasemman puoleisen sovitteen ”mutkan” kohdalla. Positiot #5 ja #6 sijaitsevat traktorin keskilinjän suhteen symmetrisesti toisiinsa nähden, mutta lepomas-

sakuormalla (0 kN) mitatuissa jännityksissä oli jonkin verran eroa, jonka todettiin johtuvan venymäliuskojen paikoitustoleranssista sekä pienistä symmetriaeroista kuormaimen rakenteessa. Venymämittauksen nollaus tehtiin ennen etukuormaimen asennusta. Ero vasemman ja oikean puolen välillä kasvoi hieman kuormitusta lisättäessä, minkä todettiin johtuneen kuormituspisteen lievistä toispuoleisuudesta tai kuormitus sylinterin asentovirheestä (ts. kuormitus sylinteri ei ole täsmälleen 90 asteen kulmassa kuormaimen nähden).



Kuva 9.12. Kalibrointimittauksen jännitykset positioissa #5 ja #6.

Kalibrointimittaustulosten vertaaminen Ansys FEA-malliin

Kalibrointimittauksen tulokset poikkesivat huomattavasti (70 – 110 %) Ansys FEA – laskentamallin jännityksistä, joten laskentamalliin on tehtävä jatkossa tarkennuksia ja korjauksia mm. kuormituksen ja rajoite-ehtojen osalta. Taulukossa 9.1 on esitetty positiokohtaiset erot FEA:n ja kalibrointitestin mittaustulosten välillä, kun rakennetta kuormitetaan keskeisellä 20 kN:n pystysuuntaisella voimalla kuvien 9.8 ja 9.11 mukaisesti.

Taulukko 9.1. *Maksimipääjännitysten ero FEA:n ja testin välillä.*

| | FEA vs. Testi |
|-----------|---------------|
| Positio # | Ero [%] |
| 1 | 75 |
| 2 | 108 |
| 3 | 70 |
| 4 | 110 |
| 5 | 72 |
| 6 | 110 |
| 7 | 100 |
| 8 | -300 |

Testaus ISO-smooth radalla

Validointisuunnitelmaan kirjattiin, että monikappalesimulointimallien tarkentamista varten tulee hankkia lisätietoa traktorin komponenttien hetkellisistä kiihtyvyyksistä ajon aikana. Simulointityökalujen kuten MBS avulla on mahdollista suorittaa osa validointitehtävistä jo ennen fyysisten prototyyppien valmistamista ja niitä käytetään usein apuna konseptivaihtoehtojen keskinäiseen vertailuun ja lopullisen konseptin valintaan. Simulointimallien tulee olla riittävän tarkkoja, jotta ne kuvaavat luotettavasti reaali maailman toteutusta. Simulointimaalien tarkkuutta saadaan parannettua ainoastaan vertaamalla simulointien ja fyysisten testien tuloksia keskenään ja muokkaamalla malleja sen mukaisesti. Monikappalesimuloinnin tehokkaampaan hyödyntämiseen tuotesuunnittelun validoinnin työkaluna tarvittiin näin ollen lisää mittausdataa ja sitä päätettiin kerätä traktoriin ja etukuormaimeen kiinnitettävien kiihtyvyyssanturien avulla.

Kansainvälinen standardi ISO 5008 määrittelee spesifikaatiot mittalaitteille, mittausmenetelmille, mittausympäristön ominaisuuksille ja värähtelytaajuuksien painotukselle, joita tulee käyttää renkailla varustettujen maatalouskoneiden ja traktoreiden kuljettajaan kohdistuvan tärinän mittaamiseen. Tällöin tarkoitetaan yleensä kokokehon tärinämittausta, joka tulee suorittaa ja raportoida standardin määrittelemällä tarkkuustasolla. ISO 5008 standardissa on määritelty keinotekoisien ISO-smooth testiradan profiili, jota mittauksissa tulee käyttää. ISO-smooth testirata koostuu kahdesta rinnakkaisesta sadan metrin pituisesta ajourasta, jotka asetetaan vastaamaan testattavan laitteen raideväliä. Ajourien profiilit on muodostettu asettamalla tukikehikkoon erikorkuisia puupar-

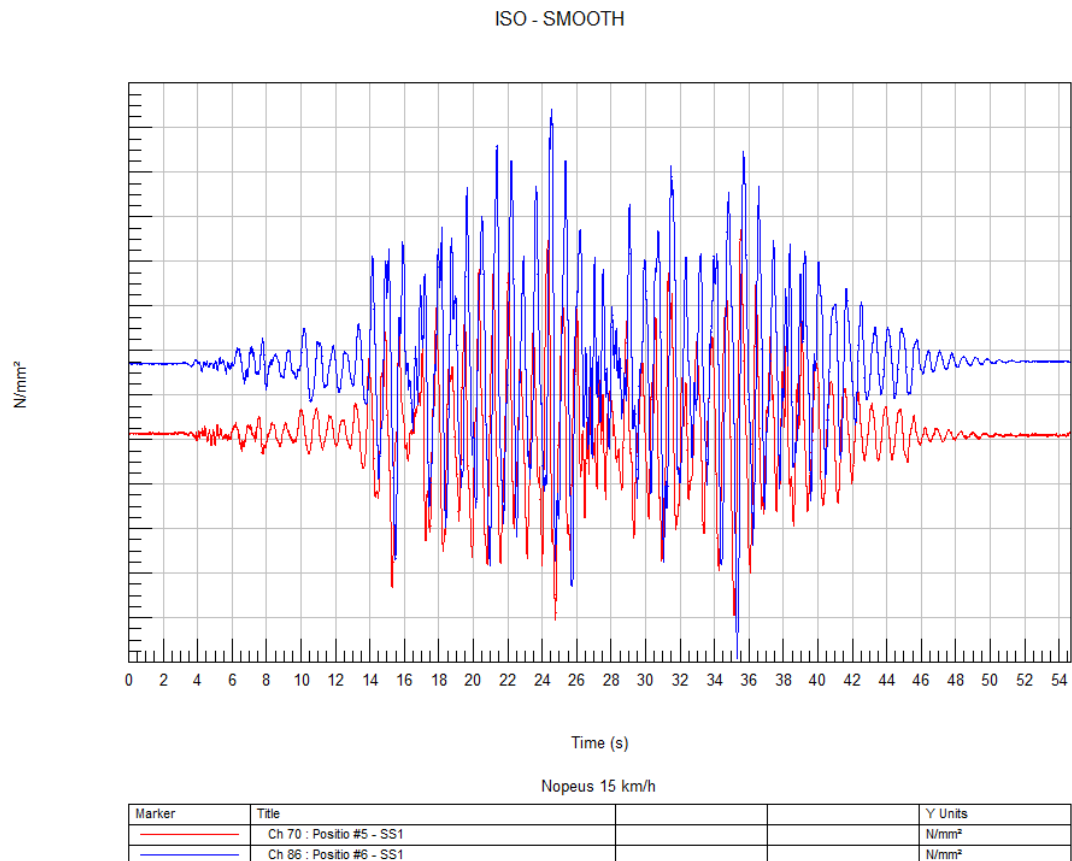
ruja (lankkuja) vieriviereen jolloin muodostuu ajouran mittainen lankkujono, jonka yläpinnan korkeus vaihtelee standardissa määritellyllä tavalla. (ISO 5008)

Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT) tarjoaa testiratapalveluja MTT Vakolan kautta ja heidän kuvassa 9.13 oleva ISO-smooth radan todettiin olevan testien toistettavuuden kannalta hyvä alusta myös traktorin rungon ja etukuormaimen kuorman hetkellisten kiihtyvyyksien mittaamiseen kiihtyvyyssanturien avulla. Alustan valintaan vaikutti vahvasti myös se, että ISO-smooth rata on mallinnettuna myös ADAMS monikappalesimulointiympäristössä, jonka ansiosta fyysisen testin mittaustulosten vertaaminen simulointituloksiin voidaan tehdä mahdollisimman luotettavalta pohjalta.



Kuva 9.13. Testitraktori Vakolan ISO-Smooth radalla.

Kiihtyvyyssmittausten lisäksi tietoa kerättiin myös venymäliuskojen ja paine-anturien avulla ja näitä tietoja voidaan jatkossa käyttää hyödyksi monissa eri tarkoituksissa. ISO-smooth – rataa ajettiin eri ajonopeuksilla lähtien 2 km/h:n ajonopeudesta ja nopeutta kasvatettiin aina 15 km/h:ssa saakka, jolloin ajonopeuden voitiin todeta olevan huomattavasti suurempi kuin normaalissa käytössä vastaavalla alustalla. Tällä nopeudella ajettaessa jännitykset vaihtelivat positioissa #5 ja #6 kuvan 9.14 mukaisesti.

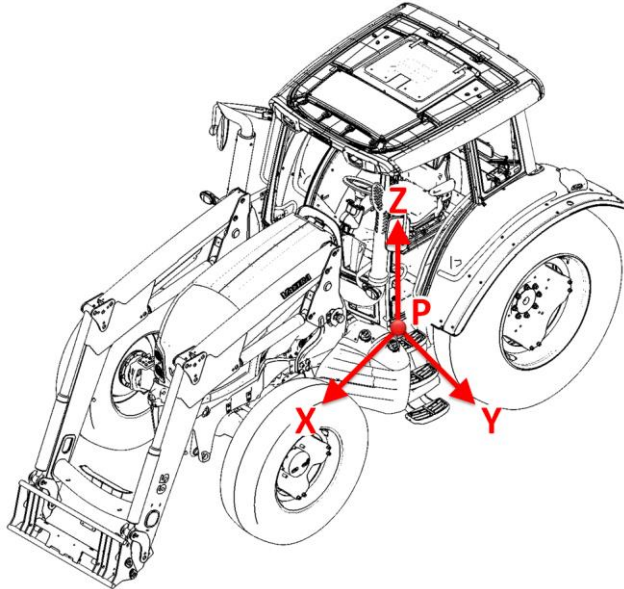


Kuva 9.14. Jännityshistoria positioissa #5 ja #6 @ 15 km/h.

Suurin osa mittauksista tehtiin 1200 Hz:n näytteenottotaajuudella käyttäen mittauksen aikaista aktiivista (Active low-pass filter) 100 Hz:n Butterworth alipäästösuodatinta. Suodatuksen toimivuuden arvioimiseksi tehtiin muutama mittaus myös ilman datan suodatusta. Mittaustuloksien visuaalisessa tarkastelussa havaittiin, että venymädatan suodattaminen 100 Hz:llä ei aiheuttanut jännityspiikkien katoamista, joten suodatettua näytteenottoa voitiin pitää toimivana. Alemmilla taajuuksilla tehtävän datan suodattamisen vaikutusta kestoikään voidaan luotettavasti arvioida kestoikälaskennan avulla. Mittaus- ja tiedonkeruuvaiheessa 100 Hz:n alipäästösuodatusta pidettiin sopivana tasona.

Kiihtyvyyssmittausdatan vertaaminen ADAMS MBS - malliin

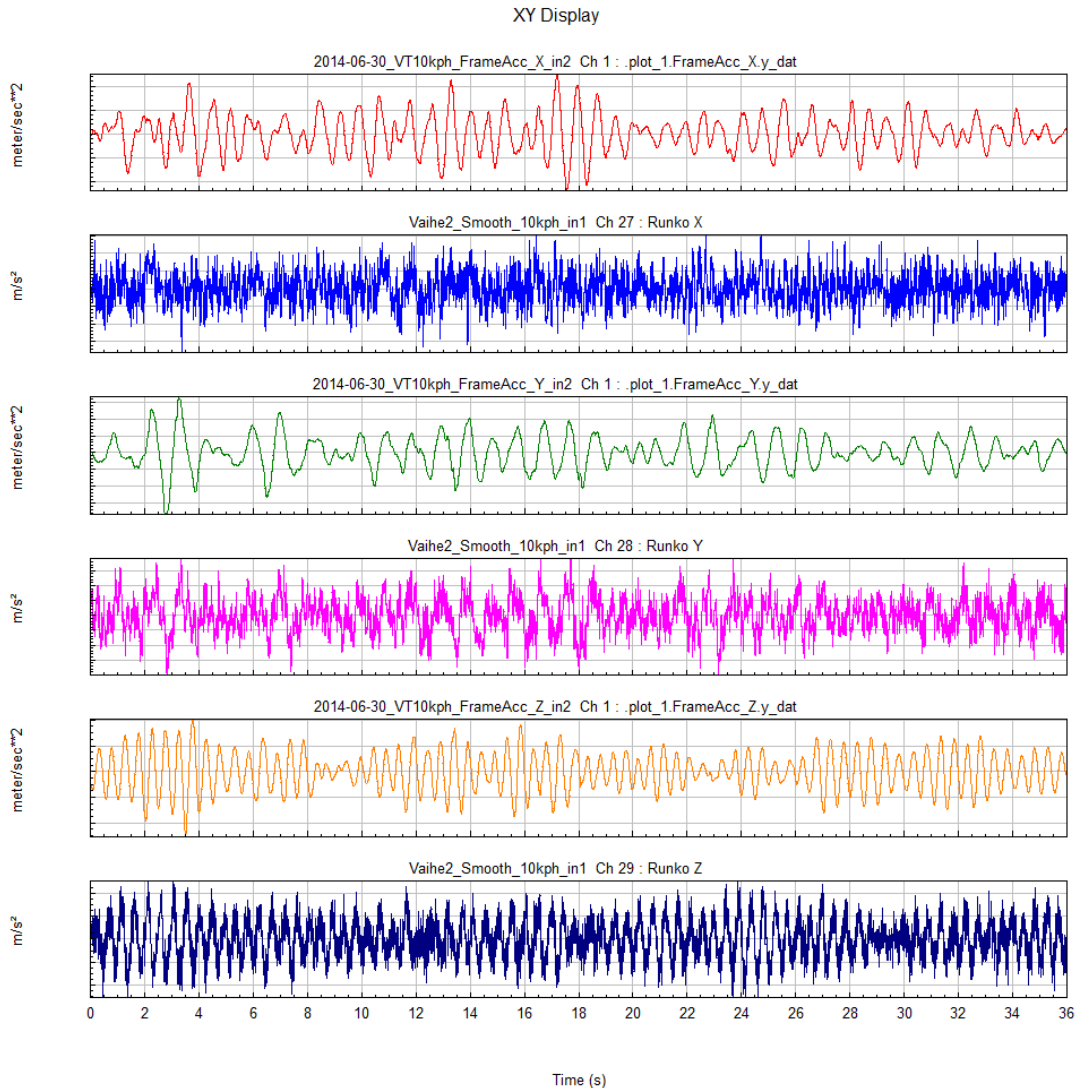
Tässä yhteydessä kiihtyvyyssmittausdataa tarkastellaan pisteissä P_F , joka sijaitsee kuvan 9.10 kiihtyvyyssanturin kiinnityskohdassa ja pisteessä P_V , joka on vastaava piste virtuaalites-tissä käytetyssä traktorin simulointimallissa. Kiihtyvyyssmittauksen pisteiden P_F ja P_V sijainti on esitetty myös kuvassa 9.15, josta selviää myös mittauksessa käytetyn koor-dinaatiston asento.



Kuva 9.15. Kiihtyvyyssmittauspiste P ja mittauskoordinaatisto. X -suunta on traktorin keskilinjän mukainen, y -suunta on traktorin taka-akselin suuntainen ja z -suunta on kohtisuoraan ylöspäin.

Sekä fyysisen testin (FT) että ADAMS ohjelmistolla tehdyn monikappalesimuloinnin eli virtuaalitestin (VT) data on käsitelty samalla tavalla. Käsitelyprosessin ensimmäisessä vaiheessa data on suodatettu 50 Hz:n Butterwoth-alipäästösuodattimella. Lisäksi FT:n data on tämän jälkeen korjattu TrendRemoval-Offset – toiminnolla, joka korjaa kiihtyvyyssmittausdatan nollatason offsetin. ISO-Smooth – radan pituus on 100 m, jonka kulkemiseen 10 km/h vakionopeudella kuluu aikaa 36 sekuntia. Radan molemmissa päissä on rampit tasaiselle alustalle. Tällä oletuksella molemmista testidatoista on poimittu toisiaan vastaavat 36 sekunnin mittausjaksot. Aikaikkunan rajaamiseen on käytetty kiihtyvyyssmittausdatan visuaalista tarkastelua sekä FT:ssä lisäksi ajonopeusdataa.

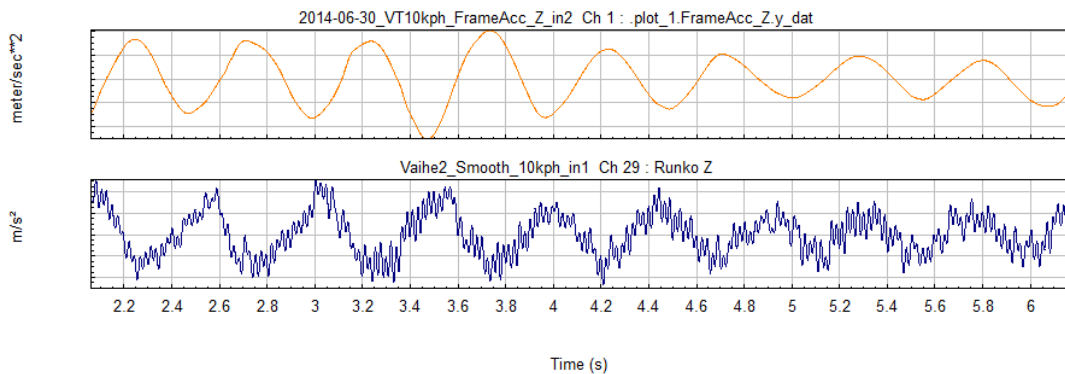
Kuvassa 9.16 on esitetty FT:n ja VT:n kiihtyvyytkuvaajat aikatasossa x-, y- ja z-suunnissa. Kaksi ylintä kuvaajaa ovat x-suuntaisen kiihtyvyyssdatan kuvaajat joista punaisella käyrällä oleva ylempi on VT:n kuvaaja ja sinisellä käyrällä oleva alempi on FT:n kuvaaja. Samalla tavalla ryhmiteltyinä ovat myös y-suuntaisen kiihtyvyyssdatan kuvaajat (kaksi keskimmäistä) ja z-suuntaisen kiihtyvyyssdatan kuvaajat eli kaksi alinta kuvaajaa.



Kuva 9.16. *Fyysisen testin (FT) ja virtuaalitestin (VT) kiihtyvyys vs. aika – kuvaajat. X-suunta: kaksi ylintä, y-suunta: kaksi keskimmäistä ja z-suunta: kaksi alinta kuvaajaa.*

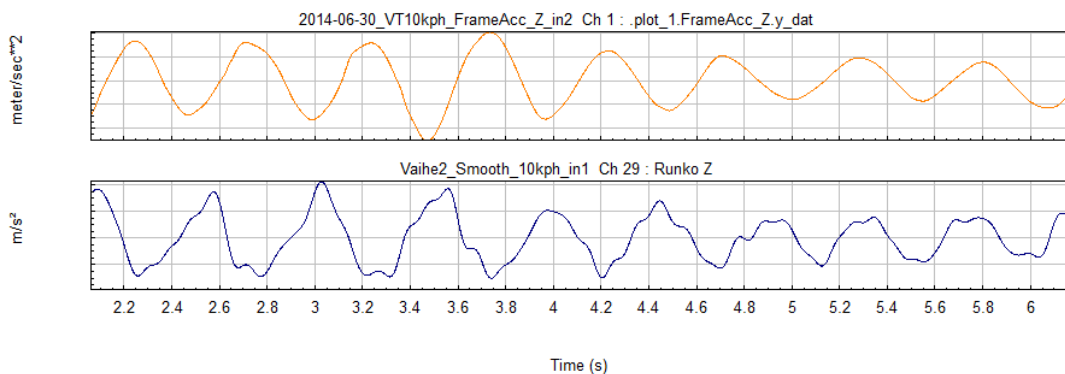
Virtuaalitestin (VT) ja fyysisen testin (FT) kuvaajat poikkeavat visuaalisesti tarkasteltuna selkeästi toisistaan siten, että VT:n kuvaajat ovat selkeitä ja sileän muotoisia käyriä, jotka kuvaavat pääasiassa pisteen P_V eli traktorista määritellyn mittauspisteen hetkellistä kiihtyvyyttä. FT:n kuvaajissa esiintyy pisteen P_F hetkellisen kiihtyvyyden lisäksi traktoriin kohdistuvien herätteiden aiheuttamien värähtelyjen kiihtyvyyksiä, joiden aiheuttajia ovat muun muassa moottorin värähtely ja alustan herätteet. Lisäksi fyysisen testin mittausjärjestelmässä syntyy aina jonkin verran kohinaa.

Z-suuntaisia kiihtyvyyksiä tarkasteltaessa kiihtyvyysskäyrien eroavaisuuden tulevat esiin vielä selkeämmin, kun kuvaajista otetaan kuvan 9.17 mukainen suurennus noin neljän sekunnin alueelta. Alemmassa FT:n kuvaajassa esiintyy selkeästi pisteen P_F hetkellisen kiihtyvyyden käyrää seuraava epädeterministinen heräte. Epädeterministisen herätteen funktiolakia ei tunneta vaan sen luonne on tilastollinen ja sen aiheuttaman vasteen ominaisuuksia pyritään kuvaamaan todennäköisyyslaskennan keinoin (Salmi 2006). Epädeterministisen herätteen lähteinä voivat olla muun muassa rengaskuvion tai moottorin aiheuttamat herätteet, mutta nämä eivät olleet tämän tutkimuksen kiinnostuksen kohteena.



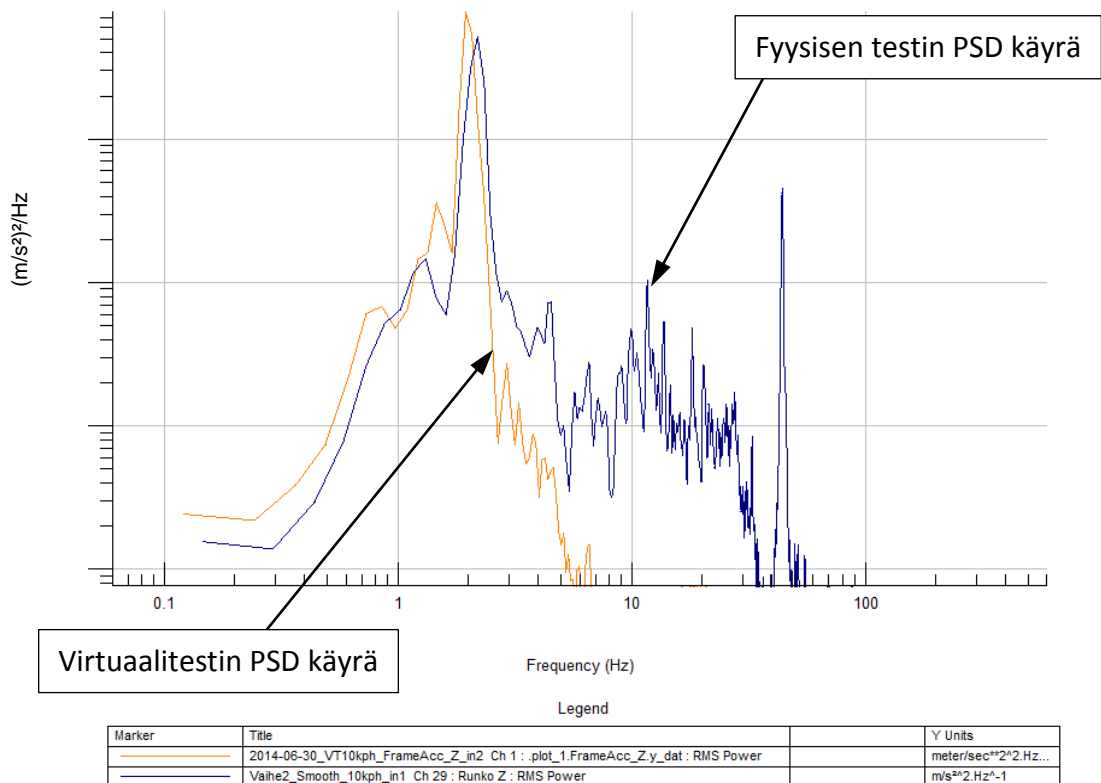
Kuva 9.17. *Fyysisen testin (FT) ja virtuaalitestin (VT) z-suuntaiset kiihtyvyydet vs. aika – kuvaajat tarkasteltuna aikavälillä 2,05 – 6,15 s. Ylempi kuvaaja on virtuaalitestin ja alempi kuvaaja fyysisen testin kuvaaja. Molemmissa on käytetty 50 Hz:n alipäästösuodatinta.*

Herätteiden aiheuttamat kiihtyvyydet saadaan suodatettua käyttäen 10 Hz:n alipäästösuodatinta (low-pass filter, LP filter), jolloin fyysisen testin käyrä muuttuu huomattavasti sileämmäksi kuvan 9.18 mukaisesti.



Kuva 9.18. *Fyysisen testin (FT) ja virtuaalitestin (VT) z-suuntaiset kiihtyvyydet vs. aika – kuvaajat tarkasteltuna aikavälillä 2,05 – 6,15 s. Ylempi kuvaaja on virtuaalitestin ja alempi kuvaaja fyysisen testin kuvaaja, jonka datan suodattamiseen on käytetty 10 Hz:n alipäästösuodatinta.*

Verrattaessa virtuaalitestin (VT) ja fyysisen testin (FT) z-suunnan kiihtyvyydataa toisiinsa taajuustasossa kuvan 9.19 PSD-kuvaajan avulla havaitaan, että alemmilla taajuuksilla (0,2 – 3 Hz) FT:n ja VT:n kuvaajat ovat melko lähellä toisiaan. Suurin ero syntyy 7 Hz:n ylittävillä taajuuksilla, jolloin VT:n datassa ei ole havaittavissa lainkaan kiihtyvyyksiä. Korkeat taajuudet eivät näy VT:n datassa, koska niitä aiheuttavia herätteitä ei ole kuvattu ADAMS MBS mallissa. Korkean taajuuden herätteiden lisääminen MBS malliin on mahdollista, jos se katsotaan tarpeelliseksi.



Kuva 9.19. Z-suuntaisten kiihtyvyyksien PSD-kuvaaja. Keltainen käyrä on virtuaalitestin ja sininen fyysisen testin käyrä. Molempien datan suodattamiseen on käytetty 50 Hz:n alipäästösuodatinta. PSD-kuvaajaa tarkasteltaessa on hyvä huomata, että käytössä on log-log – asteikko.

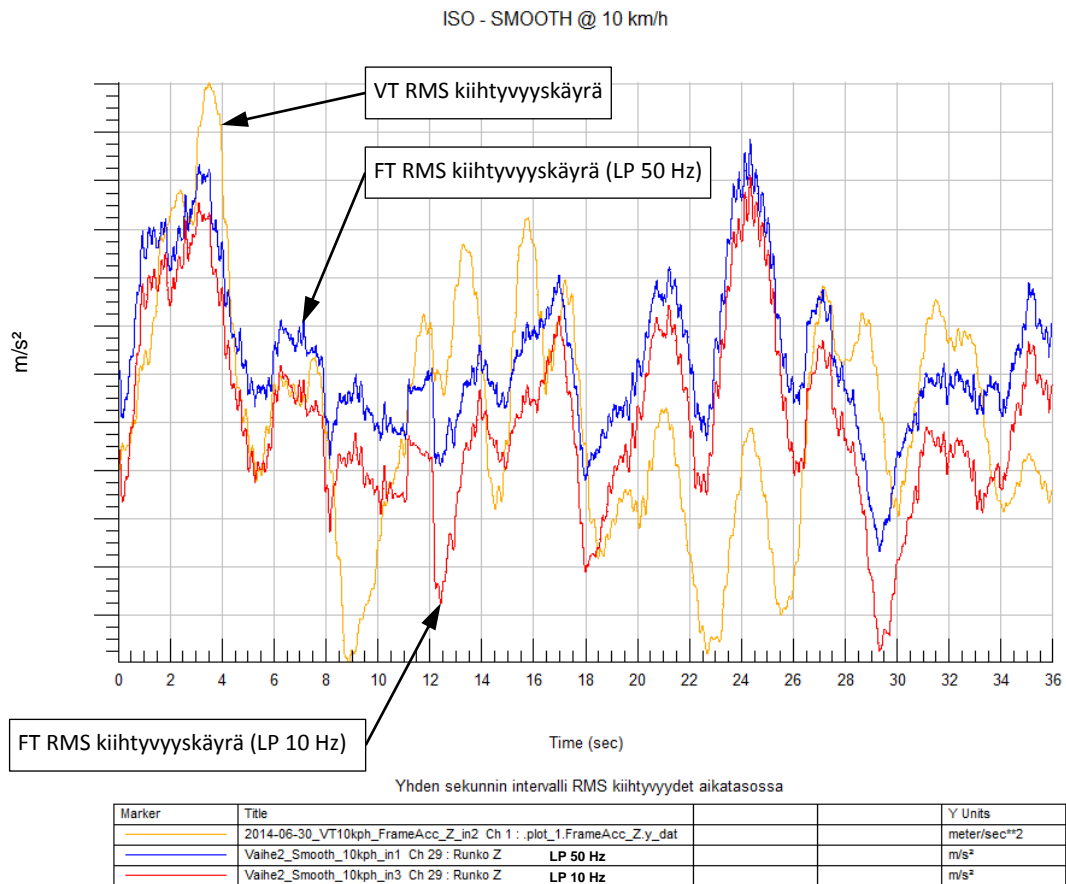
Näin ollen fyysisen testin data voidaan suodattaa 10 Hz:n alipäästösuodattimella, jos virtuaalitestauksen ja fyysisen testauksen tulosten vertaamiseen käytetään traktorin tietyn pisteen P hetkellisiä kiihtyvyyksiä. Mittaustulosten vertaaminen on havainnollisempaa, kun kiihtyvyydatasta lasketaan juoksevat RMS-arvot (Root Mean Square) yhden (1) sekunnin intervallilla pisteestä pisteeseen periaatteella.

Kuvassa 9.20 on intervalli RMS kiihtyvyyden kuvaaja aikatasossa esitettynä, jossa oranssi käyrä on virtuaalitestin RMS kiihtyvyysskäyrä ja sininen ja punainen käyrä ovat fyysisen testin RMS kiihtyvyysskäyriä kahdella eri alipäästösuodattimella käsiteltynä. Alipäästösuodatuksen muutos 50 Hz:stä 10 Hz:iin pienentää hieman RMS arvoja, mutta se ei vaikuta merkittävästi käyrien muotoon. Kuvasta 9.20 nähdään, että FT:n ja VT:n kuvaajien profiili on hyvin samankaltainen, mutta kiihtyvyyksien voimakkuudessa on paikoin suuriakin eroja.

Z-suunnassa kiihtyvyys vs. aika – datan koko 36 sekunnin aikajaksoista lasketut RMS-arvot ovat seuraavat:

- Fyysinen testi (FT) RMS kiihtyvyyden keskiarvo (LP 50 Hz) = $1,697 \text{ m/s}^2$
- Fyysinen testi (FT) RMS kiihtyvyyden keskiarvo (LP 10 Hz) = $1,466 \text{ m/s}^2$
- Virtuaalitesti (VT) RMS kiihtyvyyden keskiarvo = $1,518 \text{ m/s}^2$

RMS kiihtyvyyden keskiarvojen perusteella voidaan todeta, että simulointimalli kuvaa melko hyvin fyysisen mallin käyttäytymistä ja käyrien muotoa tarkastelemalla pystytään kartoittamaan simulointimallin mahdolliset kehitystarpeet ja iteroimalla tarkentamaan mallia.



Kuva 9.20. Intervalli RMS kiihtyvyydet aikatasossa (z-suunta).

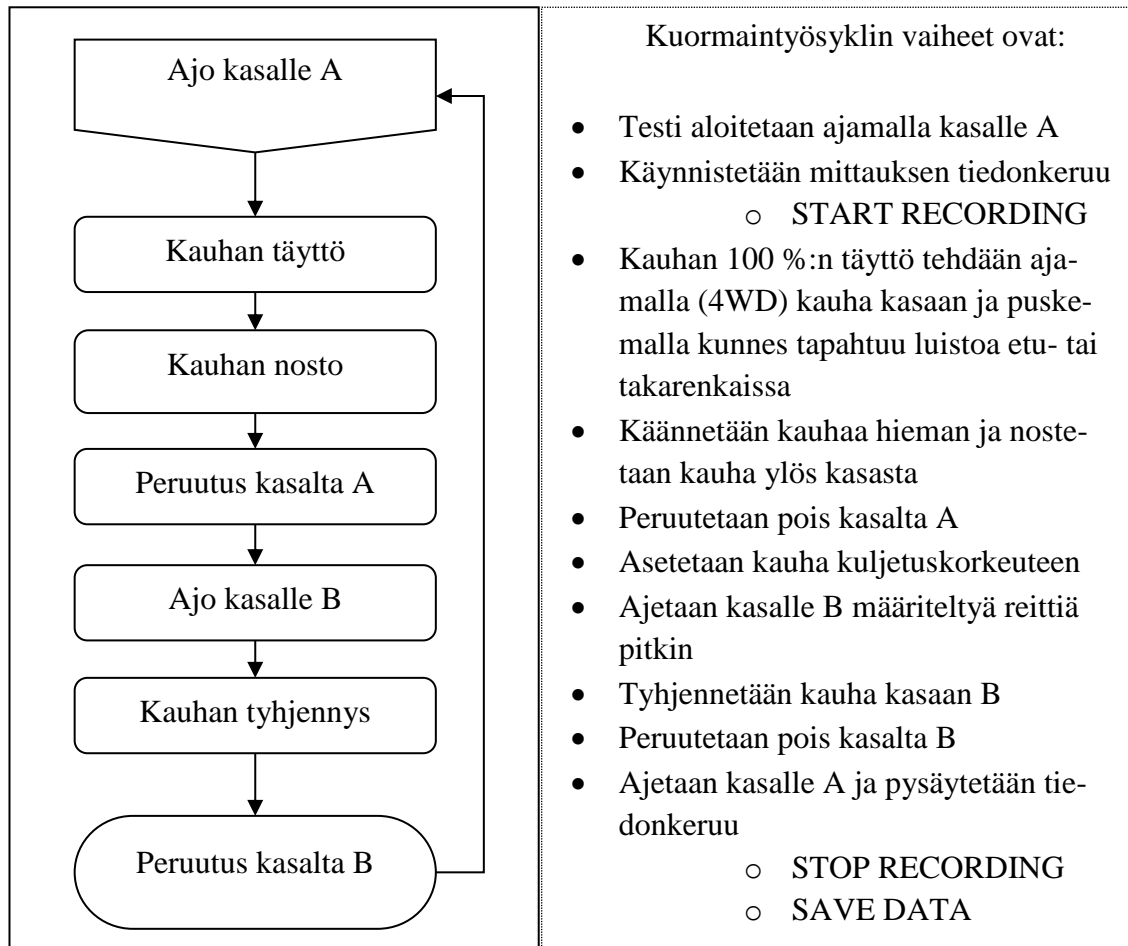
Fyysisen testin kiihtyvyyssuodatus 10 Hz:n alipäästösuodattimella osoittaa, että eroavaisuudet RMS kiihtyvyysskäyrien välillä eivät johdu esimerkiksi rengaskuvion tai moottorin aiheuttamista herätteistä vaan simulointimallin ja fyysisen traktorin välisistä eroista niiden mekaniikassa. Taulukossa 9.2 on luettelo tunnetuista eroavaisuuksista virtuaalitestissä käytetyn simulointimallin ja fyysisessä testissä käytetyn traktorin välillä. Simulointimallin jatkokehityksen yhteydessä olisi hyvä tutkia miten joidenkin komponenttien materiaalimallin muuttaminen jäykän kappaleen mallista joustavan kappaleen malliin sekä rengaspaineen nosto 1,2 barista 1,7 bariin vaikuttavat mittaustulosten välisiin eroihin. Materiaalimallin muuttaminen jäykän kappaleen mallista joustavan kappaleen malliin lisää monikappalesimuloinnin laskentatehon tarvetta huomattavasti ja pidentää simulointi aikaa.

Taulukko 9.2. Tunnetut eroavaisuudet fyysisen testin ja virtuaalitestin välillä.

| Kuvaus | FT (fyysinen testi) | VT (virtuaalitesti) |
|-------------------------|---|---|
| Rengaspaine | 1,7 bar | 1,2 bar |
| Rengaskuvio | Ripakuvio | Sileä |
| Materiaalimalli | Joustava kappale (flexible body) | Jäykkä kappale (rigid body) - paitsi renkaat, jotka on mallinnettu joustaviksi |
| Testirataprofiili | Lankkujono, portaittain muuttuva profiili | Pisteestä pisteeseen tasaisesti muuttuva profiili |
| Mittausepävarmuus | Kohina, piikit, kalibrointi | - |
| Moottorin värähtely | Moottorin herätteet | - |
| Voimansiirron värähtely | Voimansiirron herätteet | - |
| Etukuormain | Hydrauliikan joustot ja rakenteessa olevat välykset | Ei hydrauliikan joustoja eikä välyksiä rakenteessa |
| Renkaat ja vanteet | Ympyrämäisyydessä on valmistustarkkuudesta johtuvia heittoja | Täysin ympyrämäinen |
| Rengasmalli | Todellinen | Matemaattinen, joka sisältää epävarmuustekijöitä |
| Kuljettaja | Kuljettajan käyttäytymisen vaikutukset nopeuden muutokseen ja ajonaikaiset ohjausliikkeet | - |

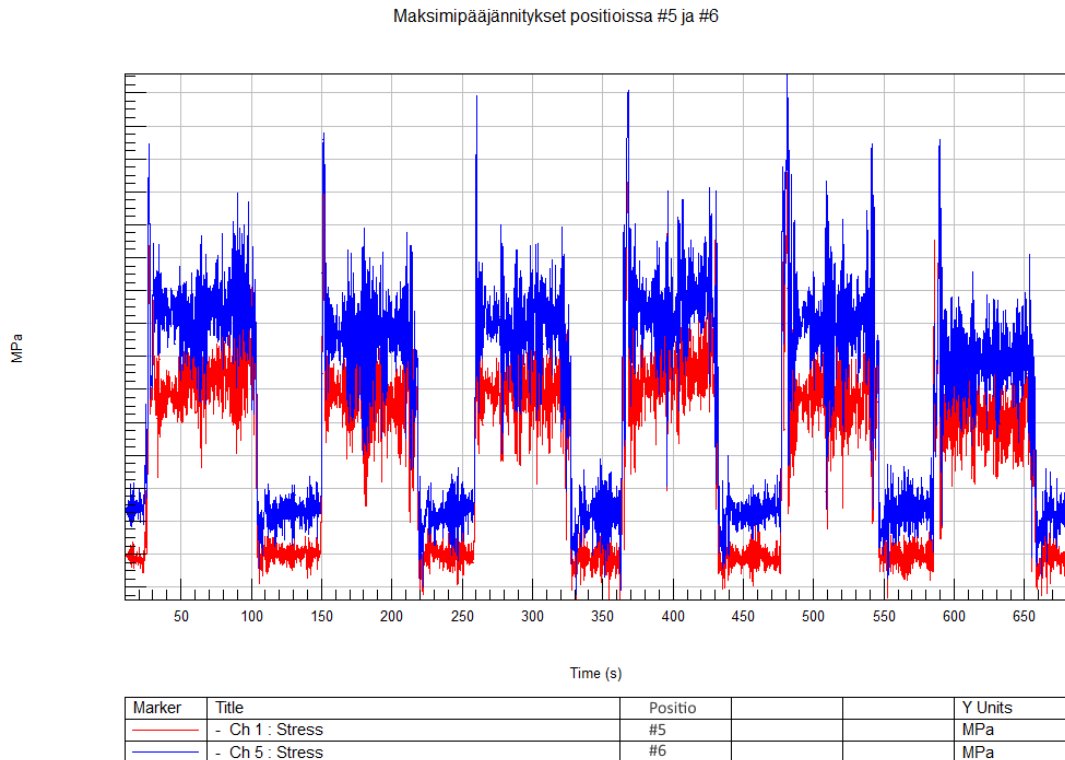
Testaus kenttäolosuhteissa

Kenttätestivaiheessa oli tarkoituksena kerätä informaatiota runkosovitteisiin kohdistuvista rasituksista eri etukuormaintyövaiheissa. Tiedon keräämiseen käytettiin venymä-, kiihtyvyyss- ja painemittausta ja etukuormaintyöksi valittiin hiekan kuormaaminen tuotekehityksen testiympäristössä siten, että hiekkaa kuormataan pisteestä A pisteeseen B kuvan 9.21 työsyklikaavion mukaisesti.



Kuva 9.21. *Kuormaintyösyklin vaiheet.*

Kuvassa 9.22 on esitetty hiekan kuormauksen työsyklin aiheuttama jännityshistoria positioidissa #5 ja #6, mitkä sijaitsevat runkosovitteen alaosassa kuvan 9.8 mukaisesti. Mittausdatasta on rajattu tarkasteltavaksi aikajaksoksi väli 10 – 680 sekuntia, jolloin mittauksen käynnistyksen ja pysäytyksen aikainen data on rajattu pois. Kuvaajasta erottuu selkeästi matalan kuormituksen vaiheet, jolloin ajetaan kauha tyhjänä ja korkean kuormituksen vaiheet, jolloin varsinainen hiekan käsittely tapahtuu. Jännityshistoria muodostuu yhteensä kuudesta kuvan 9.21 mukaista työsyklickierrosta ja venymädatan suodattamiseen on käytetty 20 Hz:n Butterworth alipäästösuodatinta.



Kuva 9.22. Työsyklin jännityshistoria positioidissa #5 ja #6 aikavälillä 10 – 680 s. Datan suodattamiseen on käytetty 20 Hz:n alipäästösuodatusta (Butterworth).

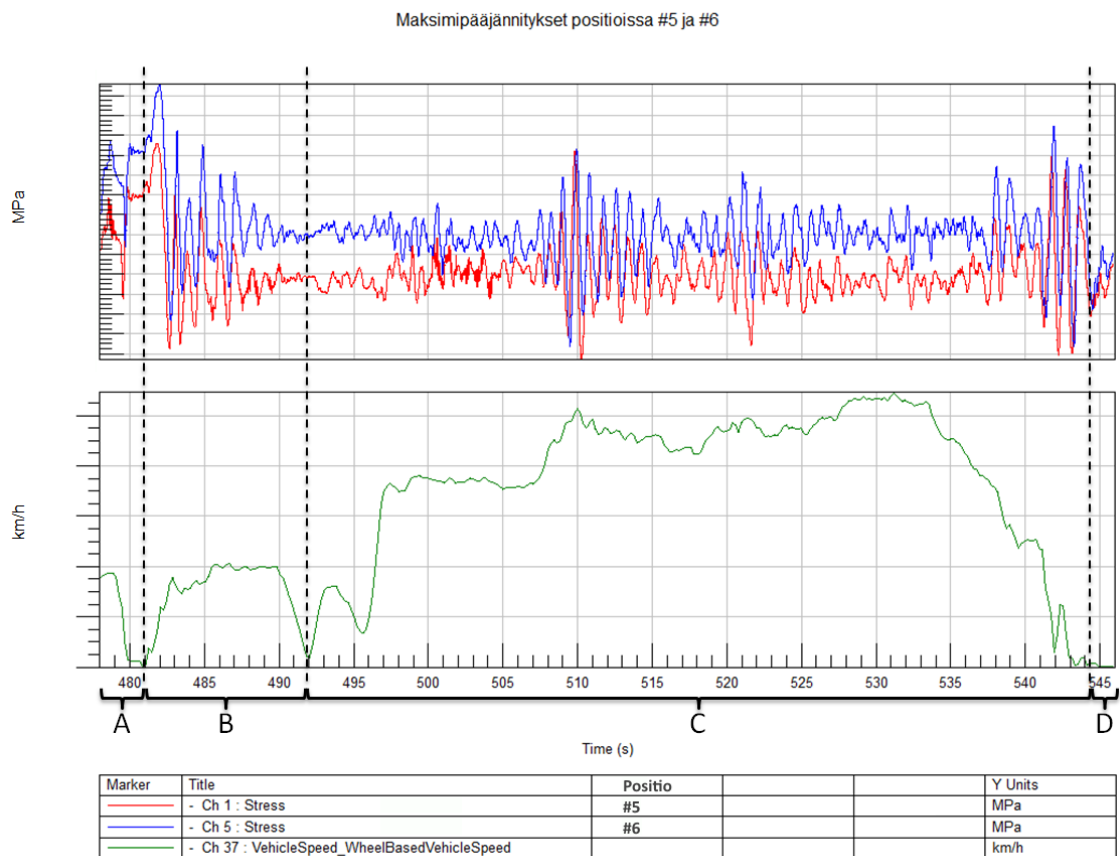
Työsyklin aikana etukuormaimen kuorma muodostui testissä käytetyn kauhan ja hiekan yhteismassasta, jonka arvioitiin olevan noin 1800 kg ja, josta aiheutui noin 20 kN:n pystysuuntainen staattinen voima traktorin ollessa paikallaan. Runkosovitteisiin kohdistuva dynaaminen kuormitus syntyi etukuormaimella tehdystä työstä ja kuorman liikuttamisesta traktorin avulla.

Kuvaan 9.23 on otettu tarkasteluun 9.22 viidennen kuormausjakson vaiheita eli aikavälin 478 - 546 s jännityshistoria, jolloin ajonopeuden kuvaajan avulla tarkasteltuna jännityshistoriasta voidaan erottaa työsyklin eri vaiheet, jotka on merkitty kaarisulkein aika-akselin alapuolelle.

Testin työsyklin vaiheet kuvan 9.23 kuvaajasta tarkasteltuna ovat:

- A) Kauhan täyttö (kasalla A)
 - Kauhaa pusketaan kasaan kunnes renkaissa tapahtuu luistoa.
- B) Kauhan kääntö + nosto + peruutus
- C) Kuorman kuljetus (Ajo kasalle B)
 - Kuormain nostetaan yläasentoon kuljetuksen loppuvaiheessa.
- D) Kauhan tyhjennys (kasalla B)

Kuvaajassa ajo kasalle A ja peruutus kasalta B on leikattu pois.



Kuva 9.23. Hiekan kuormaustyösyklin jännityshistoria. Ylemmässä kuvaajassa jännitykset [MPa] ja alemmassa ajonopeus [km/h]. Työsyklin eri vaiheet (A-D) on merkitty kaarisulkein aika-akselin alapuolelle.

Hiekan kuormaustyössä runkosovitteen korkein jännitystaso syntyy sillä hetkellä, kun hiekkakasan tuki poistuu kauhan alapinnalta eli tilanteessa, jossa kauha on puskettu täyteen hiekkaa ja traktori peruutetaan kasalta pois päin. Positioissa #5 ja #6 kyseinen tapahtuma on kuvasta 9.23 tarkasteltuna vaiheen B alussa. Yleisesti ottaen suurimmat kuormitukset syntyvät vaiheissa A-B ja D, eli kauhan täytön ja tyhjennyksen yhteydessä. Kuljetusvaiheessa korkeammat jännitykset syntyvät nopean kiihdytyksen (kohdassa 508-510 s) sekä pinnan epätasaisuuksien johdosta. Myös muissa runkosovitteen positioissa jännitysvaihtelut ovat samankaltaisia.

9.3.3 Runkosovitteen kestoikälaskennan matemaattinen malli

Kuormitustyyppien määrittäminen

Oikean ja riittävän lujuustarkastelutavan määrittämiseksi rakenteelle tulee määrittellä kuormitustyyppi. Norton (2006) jakaa kuormitustyyppit neljään eri luokkaan taulukon 9.3 mukaisesti, joiden mukaan rakenteelle määritellään tarvittava laskentatapa.

Taulukko 9.3. *Kuormitusluokat (Norton 2006).*

| | Pysyvä kuormitus | Ajasta riippuva kuormitus |
|------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Paikallaan pysyvät elementit | Luokka 1 | Luokka 2 |
| Liikkuvat elementit | Luokka 3 | Luokka 4 |

Nortonin (2006) määritysten mukaan työssä tarkasteltava kokonaisuus kuuluu luokkaan 4 ja rakenteelle vaaditaan dynaaminen kuormitusanalyysi.

Kuormituslajin määrittäminen

Traktoria käytetään hyvin erilaisissa olosuhteissa ja siihen voidaan kytkeä monenlaisia työkoneita- ja laitteita. Myös kuvan 9.23 kuvaajasta voidaan päätellä, että kyseessä on satunnaistyyppinen dynaaminen kuormitus eikä kuormituksessa ole havaittavissa selkeää jaksollisuutta.

Murtolujuuden teoreettinen estimointi

Todellisen komponentin murtolujuus poikkeaa standarditestikappaleilla tehtyjen kesto-testien tuloksista lasketusta keskimääräisestä murtolujuudesta $S_{t,u,std}$. Näin ollen todellisen komponentin murtolujuuden $S_{t,u}$ arvioimiseen käytetään korjauskertoimia C_D joka on kappaleen koon korjauskerroin ja C_R joka on luotettavuuden korjauskerroin (Lee 2012).

$$S_{t,u} = C_D C_R S_{t,u,std} \quad (9)$$

FKM-Guideline (Haibach 2003) määritelmän mukaan suunniteltavan komponentin murtolujuus tulisi perustua 97,5 %:n luotettavuustasoon (Lee 2012).

$$C_R = 0,843 \text{ (97,5 \%:n luotettavuus)} \quad (10)$$

Koon korjauskerrointa C_D käytetään huomioimaan todellisen komponentin koon vaikutusta lujuuteen, kun sitä verrataan standarditestikappaleen (halkaisijaltaan 7,5 mm) lujuuteen.

Teräkselle, valuteräkselle, pallografiittivaluraudalle (ductile irons) ja taottavalle valuraudalle kerroin C_D määritetään seuraavasti:

$$C_D = 1, \quad \text{kun} \quad d_{eff} \leq d_{eff,min} \quad (11)$$

$$C_D = \frac{1 - 0,7686 \times a_d \times \log(d_{eff}/7,5 \text{ mm})}{1 - 0,7686 \times a_d \times \log(d_{eff,min}/7,5 \text{ mm})}, \quad \text{kun} \quad d_{eff} > d_{eff,min} \quad (12)$$

jossa d_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen halkaisija ja $d_{eff,min}$ sekä a_d ovat taulukon 9.4 mukaisia vakioita.

$$d_{eff} = \frac{4V}{O} = 3130 \text{ mm}, \quad (13)$$

jossa V on tarkasteltavan kappaleen tilavuus ja O on poikkileikkauksen pinta-ala.

Tarkasteltava kohta on kuormaimen sovitteeseen asennetun venymäliuskarusetin asennuspiste positiossa #6. Kysein kohdan poikkileikkauksen pinta-ala O on määritetty venymäliuskadatasta saadun 1. pääjännityksen suunnan eli pääsuunnan normaalitason mukaisesti ja pinta-ala ja tilavuus on mitattu kappaleen 3D mallista liitteen 3 kuvan mukaisesti. Näin ollen tilavuus ja pinta-ala ovat:

$$V = 1,405 \times 10^7 \text{ mm}^3 \quad (14)$$

$$O = 1,796 \times 10^4 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

Kaavan 12 mukaan laskettu koon korjauskerroin C_D on näin ollen

$$C_D = 0,779, \quad (16)$$

mikä johtaa liian konservatiiviseen murtolujuuden arvoon $S_{t,u} = 328 \text{ MPa}$, kun myötöraja on 320 MPa.

Kaavan 12 mukaan lasketun koon korjauskertoimen ollessa epäkelpo päädytään käyttämään korjauskertoimen arvoa

$$C_D = 1 \quad (17)$$

Todellisen kappaleen murtolujuuden arvoksi saadaan

$$S_{t,u} = C_D C_R S_{t,u,std} = 1 \times 0,843 \times 500 \text{ MPa} = 421,5 \text{ MPa} \quad (18)$$

Taulukko 9.4. Koon korjauskertoimen laskentaan tarvittavia vakioita (Lee 2012).

| Material Type | $d_{\text{eff,min}}$ (mm) | a_d | Case of d_{eff} |
|--|---------------------------|-------|--------------------------|
| Plain carbon steel | 40 | 0,15 | Case 2 |
| Fine-grained steel | 70 | 0,20 | Case 2 |
| Steel, quenched and tempered | 16 | 0,30 | Case 2 |
| Steel, normalized | 16 | 0,10 | Case 2 |
| Steel, case hardened | 16 | 0,50 | Case 1 |
| Nitriding steel, quenched and tempered | 40 | 0,25 | Case 1 |
| Forging steel, quenched and tempered | 250 | 0,20 | Case 1 |
| Forging steel, normalized | 250 | 0,00 | Case 1 |
| Steel casting | 100 | 0,15 | Case 2 |
| Steel casting, quenched and tempered | 200 | 0,15 | Case 1 |
| Ductile irons | 60 | 0,15 | Case 1 |
| Malleable cast iron | 15 | 0,15 | Case 1 |

Runkosovitteen väsymisrajan teoreettinen estimointi

Väsymisraja sileälle kiillotetulle komponentille määritetään vetojännityksen tapauksessa seuraavasti:

$$S_{s,\sigma,E} = C_{\sigma,E} C_{E,T} S_{t,u}, \quad (19)$$

jossa $C_{E,T}$ on lämpötilakorjauskerroin väsymisrajalle ja $C_{\sigma,E}$ on normaalijännityksen väsymisrajakerroin.

Käyttölämpötila jää alle 100 °C:een, joten käytetään lämpötilakerrointa

$$C_{E,T} = 1 \quad (20)$$

Väsymisrajakerroin $C_{\sigma,E}$ saadaan taulukosta 9.5 Ductile iron mukaisesti siten, että

$$C_{\sigma,E} = 0,34 \quad (21)$$

Taulukko 9.5. Väsymisrajakertoimet eri materiaaleille (Lee 2012).

| Material Type | $C_{\sigma,E}$ |
|------------------------------|----------------|
| Case-hardening steel | 0,40 |
| Stainless steel | 0,40 |
| Forging steel | 0,40 |
| Steel other than above types | 0,45 |
| Steel casting | 0,34 |
| Ductile iron | 0,34 |
| Malleable cast iron | 0,30 |
| Grey cast iron | 0,30 |
| Wrought aluminum alloys | 0,30 |
| Cast aluminum alloys | 0,30 |

Väsymisraja sileälle komponentille vetojännityksen tapauksessa on

$$S_{S,\sigma,E} = 0,34 \times 1 \times 421,5 = 143,3 \text{ MPa} \quad (22)$$

Väsymisraja taivutuskuormituksen tapauksessa lasketaan seuraavasti

$$S_{S,b,E} = \frac{C_S S_{S,\sigma,E}}{K_{b,f} + \frac{1}{C_{\sigma,R}} - 1}, \quad (23)$$

jossa C_S on pintakäsittelykerroin ja $C_{\sigma,R}$ on pinnankarheuden korjauskerroin normaali-jännitykselle. $K_{b,f}$ on loven vaikutuskerroin taivutuskuormitukselle. Sileän komponentin tapauksessa käytetään loven vaikutuskerrointa $K_{b,f} = K_f = 1$.

Pintakäsittelykertoimet eri materiaaleille on esitetty taulukossa 9.6. Suluissa olevat arvot ovat halkaisijaltaan 8-15 mm oleville komponenteille ja muut arvot halkaisijaltaan 30-40 mm oleville komponenteille.

Taulukko 9.6. Pintakäsittelykertoimet eri materiaaleille (Lee 2012).

| Surface Treatment | Unnotched Components | Notched Components |
|---|----------------------|--------------------|
| Steel | | |
| Chemo-Thermal Treatment | | |
| Nitriding | | |
| Depth of case 0,1-0,4 mm | 1,10-1,15 | 1,30-2,00 |
| Surface hardness 700-1000 HV10 | (1,15-1,25) | (1,90-3,00) |
| Case hardening | | |
| Depth of case 0,2-0,8 mm | 1,10-1,50 | 1,20-2,00 |
| Surface hardness 670-750 HV10 | (1,20-2,00) | (1,50-2,50) |
| Carbo-nitriding | | |
| Depth of case 0,2-0,8 mm | (1,80) | |
| Surface hardness 670-750 HV10 | | |
| Mechanical Treatment | | |
| Cold rolling | | |
| | 1,10-1,25 | 1,30-1,80 |
| | (1,20-1,40) | (1,50-2,20) |
| Shot peening | | |
| | 1,10-1,20 | 1,10-1,50 |
| | (1,10-1,30) | (1,40-2,50) |
| Thermal Treatment | | |
| Inductive hardening, flame-hardening | | |
| Depth of case 0,9-1,5 mm | 1,20-1,50 | 1,50-2,50 |
| Surface hardness 51-64 HRC | (1,30-1,60) | (1,60-2,8) |
| Cast Iron Materials | | |
| Nitriding | 1,10 (1,15) | 1,3 (1,9) |
| Case hardening | 1,1 (1,2) | 1,2 (1,5) |
| Cold rolling | 1,1 (1,2) | 1,3 (1,5) |
| Shot peening | 1,1 (1,1) | 1,1 (1,4) |
| Inductive hardening, flame-hardening | 1,2 (1,3) | 1,5 (1,6) |

Kuormaimen sovitteille ei tehdä mitään pintakarkaisua, joten käytetään pintakäsittelykerrointa

$$C_S = 1 \quad (24)$$

Pinnankarheuden korjauskerroin vetojännitykselle lasketaan seuraavasti

$$C_{\sigma,R} = 1 - a_R \log(R_Z) \log(2 S_{t,u}/S_{t,u,min}), \quad (25)$$

jossa a_R on pinnankarheusvakio, R_Z on keskimääräinen pinnankarheus (μm) ja $S_{t,u,min}$ on minimimurtolujuus (MPa). Muuttujat a_R ja $S_{t,u,min}$ määräytyvät taulukon 9.7 mukaisesti.

Valupinnalle keskimääräinen pinnankarheus on $R_Z = 200 \mu\text{m}$.

Pinnankarheuden korjauskerroin on näin ollen:

$$C_{\sigma,R} = 1 - 0,16 \times \log(200) \times \log(2 \times 421,5/400) = 0,881 \quad (26)$$

Talukko 9.7. Muuttujien a_R ja $S_{t,u,min}$ arvot eri materiaaleille (Lee 2012).

| Materials | a_R | $S_{t,u,min}$ (MPa) |
|-------------------------|-------|---------------------|
| Steel | 0,22 | 400 |
| Steel castings | 0,20 | 400 |
| Ductile iron | 0,16 | 400 |
| Malleable cast iron | 0,12 | 350 |
| Grey cast iron | 0,06 | 100 |
| Wrought aluminum alloys | 0,22 | 133 |
| Cast aluminum alloys | 0,20 | 133 |

Väsymisraja taivutuskuormituksen tapauksessa on näin ollen:

$$S_{s,b,E} = \frac{1 \times 143,3 \text{ MPa}}{1 + \frac{1}{0,881} - 1} = 126,2 \text{ MPa} \quad (27)$$

S-N kuvaajan teoreettinen estimointi muuttuva-amplitudisessa kuormituksessa

S-N – kuvaaja pohjautuu vakioamplitudisen kuormituksen perusteella määriteltyyn kestoikään. Tässä tapauksessa on kyse muuttuva-amplitudisesta kuormituksesta, jonka keskiännitys $S_{\sigma,m} > 0$. Muuttuva-amplitudinen jännityshistoria voidaan muuntaa rainflow-laskentamenetelmän avulla sellaiseen muotoon, että kestoian laskemiseen voidaan käyttää S-N – kuvaajaa. Muuttuva-amplitudisen kuormituksen yhteydessä käytetään muokattua S-N – kuvaajaa, joka pyrkii ottamaan huomioon myös väsymisrajan alapuolella olevat kuormitukset. Tässä yhteydessä käytetään FKM-Guidelinen mukaista Miner-Haibachin mallia (Lee 2012). Koska tarkastelun alla olevien osien materiaalista ei ole käytettävissä kokemusperäistä kestoikädataa, niin käytetään Leen (2012) suositusten mukaista FKM-Guidelinen laskentaa. Muuttuva-amplitudisen kuormituksen tapauksessa S-N – kuvaajan parametrit lasketaan $10^3 - 10^6$ syklin välisellä alueella vastaavalla tavalla kuin vakioamplitudisen kuormituksen tapauksessa.

Komponentin kestoiän arvioimiseen käytetään seuraavia kaavoja:

$$N \times S_a^k = A_1, \text{ kun } N \leq 10^6 \text{ ja} \quad (28)$$

$$N \times S_a^{2k-1} = A_2, \text{ kun } N > 10^6, \quad (29)$$

joissa S_a on väsymislujuus kyseisellä syklimäärällä N kertoimien k ja A_i ($i=1,2$) määrittelemällä alueella. HCF alueella väsymisrajan ($S_{s,b,E}$) oletetaan olevan syklimäärän $N_E = 10^6$ kohdalla niiden materiaalien osalta, jotka omaavat väsymisrajan.

FKM-Guidelineen määritelmän mukaan teräs- ja valurautakomponenttien kulmakerroin on pintakarkaisemattomille pinnoille $k = 5$ ja pintakarkaistuille pinnoille kulmakerroin $k = 3$ normaalijännityksen tapauksessa. Nämä arvot ovat voimassa välillä $10^3 - 10^6$ sykliä. Syklimäärällä $N > 10^6$ käytetään kulmakerrointa $2k-1$ Haibachin mallin mukaisesti.

Kaavoista 28 ja 29 saadaan ratkaistua kestoikäparametrien A_1 ja A_2 arvot, kun siihen sijoitetaan seuraavat arvot:

$$S_a = S_{s,b,E} = 126,2 \text{ MPa} \quad (30)$$

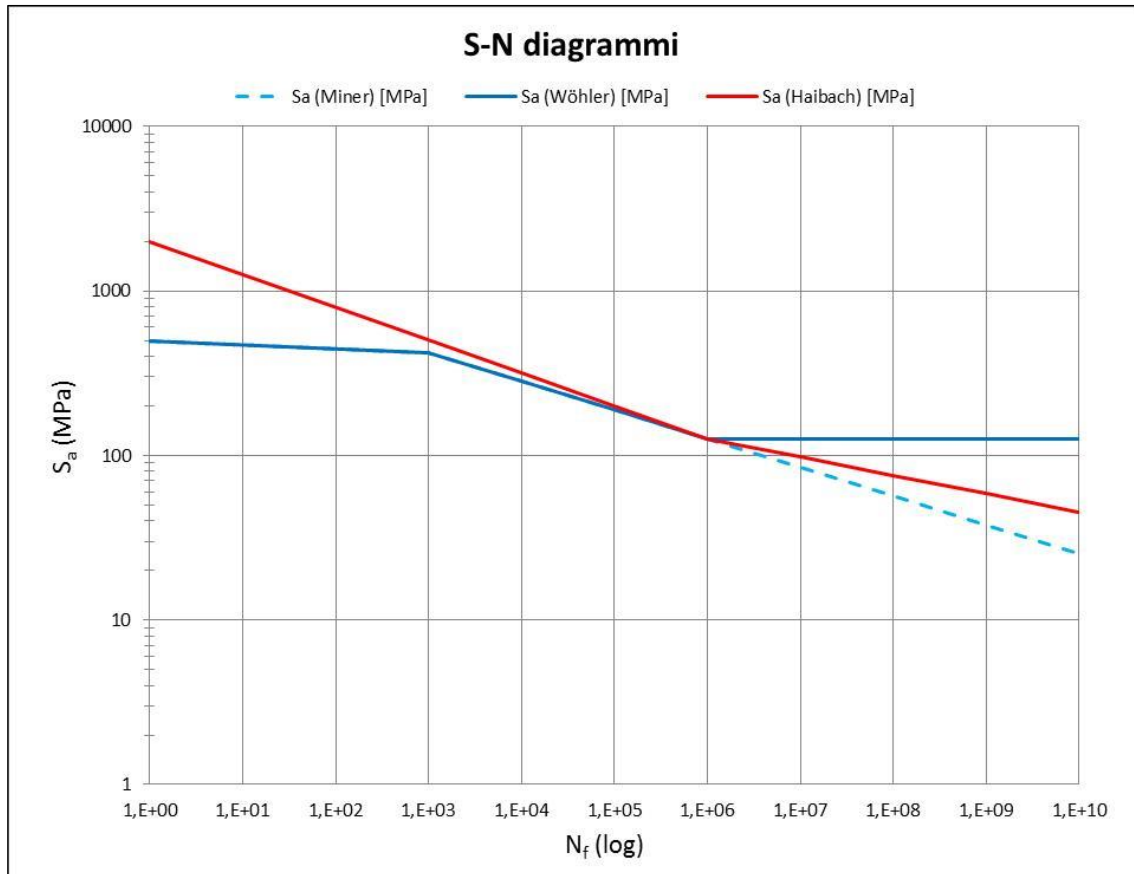
$$N = 10^6 \quad (31)$$

→

$$A_1 = 3,205 \times 10^{16} \quad (32)$$

$$A_2 = 8,136 \times 10^{24} \quad (33)$$

Ratkaisemalla kaavoista 28 ja 29 väsymislujuus S_a saadaan piirrettyä kuvassa 9.24 punaisella käyrällä oleva Haibachin mukainen S-N kuvaaja. Kuvassa 9.24 on vertailun vuoksi myös vakioamplitudisen kuormituksen Wöhler-käyrä sinisellä yhtenäisellä viivalla sekä muuttuva-amplitudisen kuormituksen Minerin käyrä sinisellä katkoviivalla. Minerin käyrä seuraa Wöhler-käyrää 10^6 sykliin saakka ja jatkuu samalla kulmakertoimella myös siitä eteenpäin.



Kuva 9.24. S-N – kuvaaja, jossa on vertailun vuoksi käyrät vakioamplitudiselle kuormitukselle (Wöhler käyrä), sekä muuttuva-amplitudiselle kuormitukselle Minerin ja Haibachin mallien mukaisesti.

Runkosovitteen kestoiän laskenta matemaattisella mallilla

Runkosovitteen kestoiän arvioimiseen käytettiin kuvan 9.22 mukaista 670 sekunnin aikajaksoa eli aikaväliä 10 – 680 s. Näin syklimäärä saatiin pidettyä HCF alueella eli $N > 10^3$, vaikka data suodatettiin 20 Hz:n alipäästösuodatuksella. 20 Hz:n alipäästösuodatuksella ei todettu olevan merkittävää vaikutusta kestoikälaskennan tuloksiin.

Muuttuva-amplitudisen kuormitushistorian omaavan komponentin kestoiän arvioimiseen käytettiin tässä tapauksessa Palmgren-Miner – vaurioitumishypoteesia (Palmgren-Miner linear damage rule, Minerin hypoteesi).

$$\sum \frac{n_i}{N_{f,i}} \geq D_{PM}, \quad (34)$$

jossa n_i on jännitysjaksojen lukumäärä ja $N_{f,i}$ on kyseisen jännitysjakson (i) mukainen kestoikä. FKM-Guidelinen suosituksen mukaan $D_{PM} = 1,0$ on rakenteen vauriosumman kriittinen arvo pallografiittivaluraudalle, harmaavaluraudalle ja taottavalvaluraudalle. Toisin sanoen, rakenteen oletetaan vaurioituvan, kun vauriosumma D_{PM} saavuttaa arvon 1,0.

Runkosovitteen kestoiän arvioimiseen käytettiin rasitetuimman kohdan eli position #6 maksimipääjännityksiä, jotka vaihtelevat kuvan 9.23 mukaisesti siten, että:

$$\sigma_{max} = \text{jännityshistorian suurin arvo (MPa) ja} \quad (35)$$

$$\sigma_{min} = \text{jännityshistorian pienin arvo (MPa),} \quad (36)$$

joiden avulla voitiin laskea seuraavat laskentaparametrit:

jännitysvaihteluväli:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}, \quad (37)$$

jännitysamplitudi:

$$S_{\sigma,a} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad (38)$$

keskijännitys:

$$S_{\sigma,m} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (39)$$

rajajännitysten suhde:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} ja \quad (40)$$

amplitudisuhde:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (41)$$

Väsymisvaurio riippuu ensisijaisesti jännitysamplitudista tai jännityksen vaihteluvälistä ja toisaalta myös keskijännityksen vaikutuksesta, joten myös keskijännitys tulee ottaa huomioon kestoikälaskennassa. HCF alueella normaalikeskijännityksellä on suuri vaikutus rakenteen kestoikään. Tässä yhteydessä käytetään maksimipääjännitys-kriteeriä, jolloin normaalijännityksenä pidetään venymäliuskamittausdatasta saatavia 1. pääjännityksen arvoja. Väsymisanalyysin moniaksaalisuuskriteerien käyttö jätetään myöhempää tarkastelua varten.

Näin ollen

$$\sigma_n = \sigma_l = SS1 \quad (42)$$

Rajajännityssuhde oli välillä $0 < R < 0,5$, jolloin maksimi- ja minimijännitykset olivat koko ajan vetojännityksen puolella ja tapaus kuului alueeseen III (Haibach 2003, Leen 2012 mukaisesti). Alueella III käytetään ns. ekvivalenttia jännitysamplitudia, mikä määritellään seuraavasti:

$$S_{\sigma,ar} = (1 + M_\sigma) \frac{S_{\sigma,a} + (M_\sigma/3)S_{\sigma,m}}{1 + M_\sigma/3} \quad (43)$$

$$M_\sigma = a_M S_{t,u} + b_M, \quad (44)$$

jossa a_M ja b_M ovat materiaaliparametreja taulukon 9.8 Ductile irons mukaisesti.

Taulukko 9.8. Parametrit a_M ja b_M eri materiaaleille (Lee 2012).

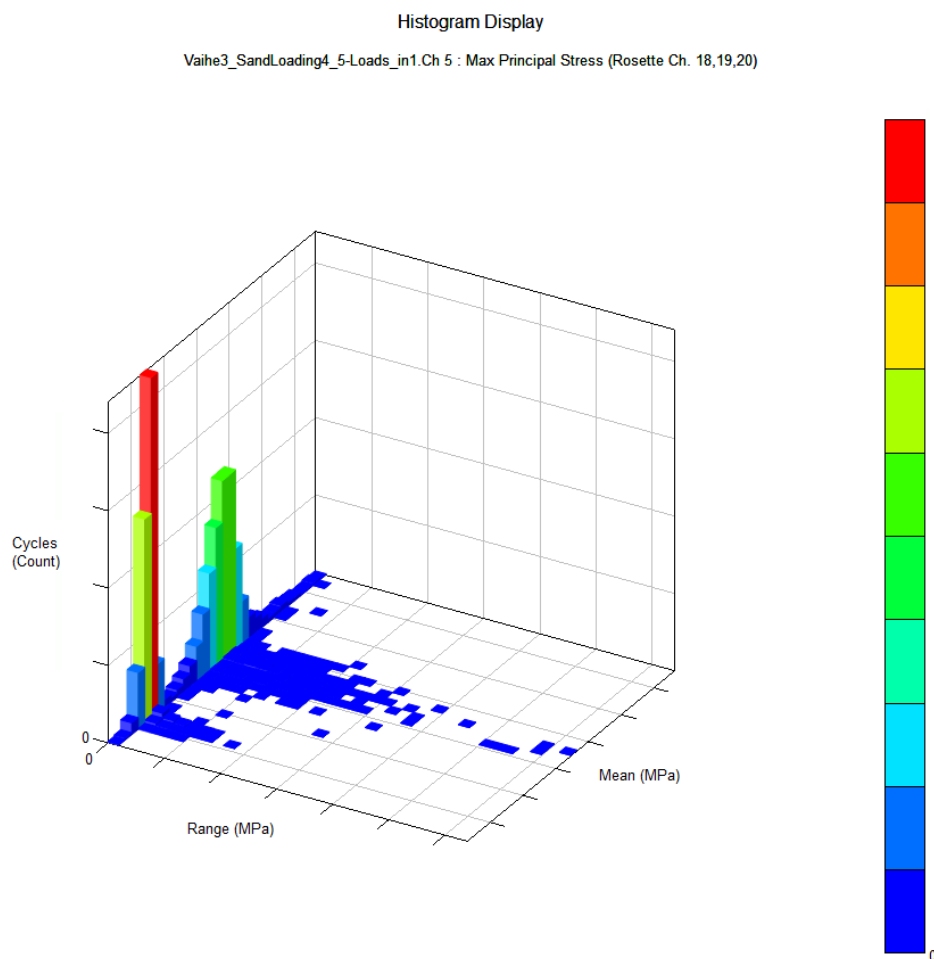
| Materials | a_M | b_M |
|-------------------------|---------|-------|
| Steel | 0,00035 | -0,1 |
| Steel casting | 0,00035 | 0,05 |
| Ductile irons | 0,00035 | 0,08 |
| Malleable cast irons | 0,00035 | 0,13 |
| Grey cast irons | 0 | 0,5 |
| Wrought aluminum alloys | 0,001 | -0,04 |
| Cast aluminum alloys | 0,001 | 0,2 |

Jännitysajaksokohtainen kestoikä $N_{f,i}$ lasketaan ekvivalenttia jännitysamplitudia käyttäen seuraavasti:

$$N_{f,i} = \frac{A_1}{S_{\sigma,ar}^k}, \quad \text{kun } N_{f,i} \leq 10^6 \text{ ja} \quad (45)$$

$$N_{f,i} = \frac{A_2}{S_{\sigma,ar}^{2k-1}}, \quad \text{kun } N_{f,i} > 10^6 \quad (46)$$

Tarkasteltavan kuormitushistorian jännitysamplitudien ja niitä vastaavien jännitysjaksojen laskentaan käytettiin rainflow-laskentamenetelmää. Rainflow-laskenta tehtiin nCode Glyphworks – ohjelmistolla, jonka tulokset on esitetty kuvan 9.25 histogrammissa. Rainflow-histogrammissa pylvään korkeus kuvaa kyseisen jännitysvaihteluvälin (Range) toistojen määrää eli syklimäärää tarkasteltavan kuormitushistorian aikana. Toisella vaak akselilla on esitetty kyseisen jännitysvaihteluvälin keskijännitys (Mean).



Kuva 9.25. Rainflow histogrammi, jossa vaak akseleilla on jännityksen vaihteluväli (Range) ja kyseisen vaihteluvälin keskijännitys (Mean) ja pystyakselilla syklien määrä.

Kuvan 9.25 rainflow-laskennan tulokset ajettiin kestoikälaskentaa varten excel-
taulukkomuotoon, minkä pohjalta kaavan 43 mukaiset ekvivalentit jännitysamplitudit
laskettiin. Jännitysamplitudien jakauma oli rainflow-laskennassa jaettu 32 luokkaan.
Seuraavaksi laskettiin kaavojen 45 ja 46 mukaiset jännitysamplitudikohtaiset kestoiät
 $N_{f,i}$ ja vaurio-sykli – suhteet ($n_i / N_{f,i}$).

Vauriosumman D_{PM} arvo saatiin kaavan 47 avulla:

$$D_{PM} = \sum \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (47)$$

Laskentaan käytetyn jännityshistorian pituus $\Delta t = 670$ sekuntia, jolloin rakenteen kes-
toian tuntimäärä position #6 jännityshistorian perusteella saatiin laskettua kaavan 48
avulla.

$$Life = \left(\frac{1}{D_{PM}} \right) \times \frac{670 \text{ s}}{3600 \text{ s}} \quad (48)$$

Kestoikä muissa positioissa saatiin laskettua vastaavalla tavalla.

Edellä esitetty kestoikälaskenta on tehty myös nCode GlyphWorks – ohjelman (GW) Stress Life – toimintoa käyttäen. Laskennassa on käytetty FKM-Guideline mukaista laskentaa ja siinä käytetyt keskeisimmät parametrit on esitetty taulukossa 9.9.

Taulukko 9.9. Keskeisimmät laskentaparametrit, joita on käytetty GlyphWorks Stress Life – kestoikälaskennassa.

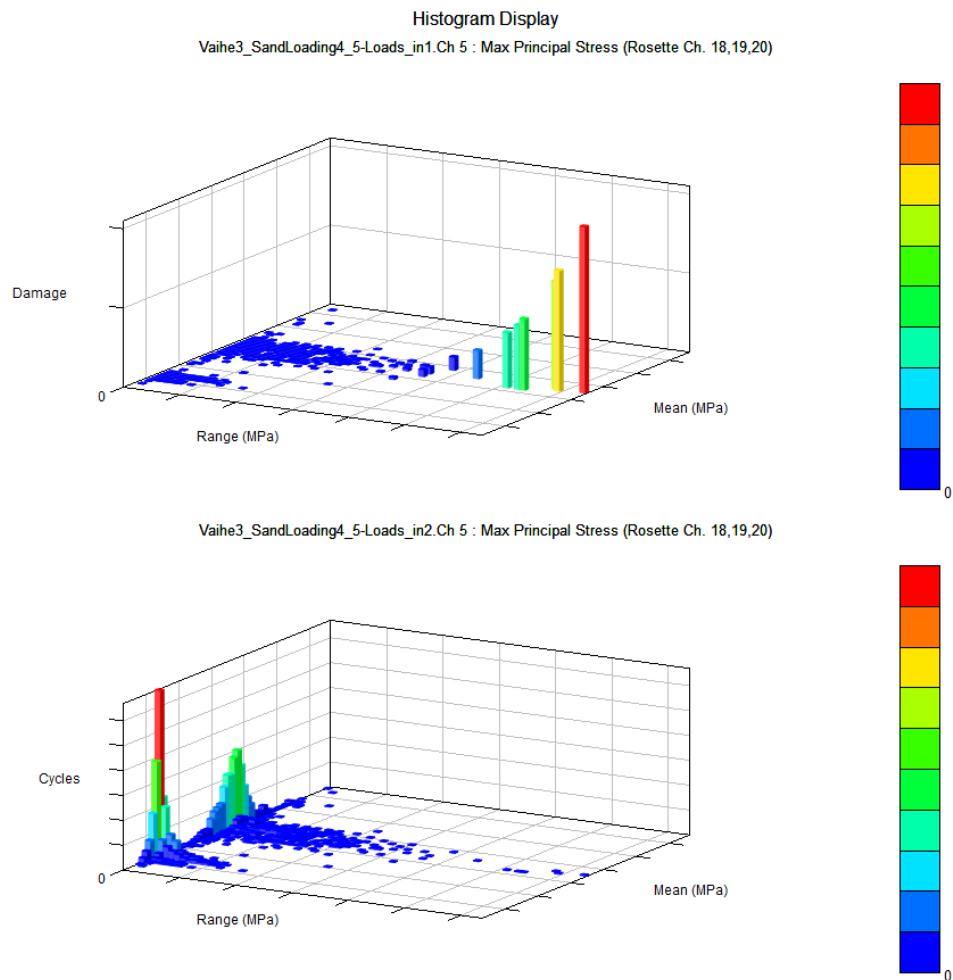
| Parametrin nimi | Arvo | Kuvaus |
|----------------------|-------------------|---|
| Mode | Damage | Suoritetaan vaurioon ja kestoikään perustuva kestoikälaskenta. |
| CalculationMethod | Standard | Käytetään standardi S-N dataan pohjautuvaa kestoikälaskentamenetelmää. |
| Kf | 1 | Väsymislajuuden korjauskerroin. |
| MaterialName | GJS500 Cast Iron | Laskennassa käytettävä materiaali. |
| MaterialDatabaseName | nCode_Premium.mxd | Materiaalitietokannan nimi. |
| SurfaceFinish | Cast | Pinnanlaadun tyyppi. Ohjelma hakee pinnanlaatua vastaavan pinnanlaatukertoimen taulukosta. Taulukkoarvo on riippuvainen murtolujuudesta. |
| SurfaceTreatment | ShotPeened | Pintakäsittelytyyppi. Ohjelma hakee pintakäsittelyä vastaavan pintakäsittelykerroimen taulukosta. Taulukkoarvo on riippuvainen murtolujuudesta. |
| CertaintyOfSurvival | 97,5 | Määrittelee luotettavuustasoa (97,5 %) vastaavan luotettavuuden korjauskertoimen. |
| MeanStressCorrection | FKM | Menetelmä, jolla otetaan huomioon keski-jännitysten vaikutus kestoikälaskennassa. |
| SmallCycleCorrection | Haibach | Menetelmä, jota käytetään pienten jännitysamplitudien huomioimiseen kestoikälaskennassa HCF alueella. |

Laskennassa käytetty materiaali on GJS-500-7, jonka S-N kuvaajan tiedot ohjelma hakee nCode_Premium.mxd – materiaalitietokannasta. Materiaalitietokannassa materiaalin GJS-500-7 murtolujuudeksi on määriteltä 579,54 MPa ja sitä vastaava Cast-pinnanlaatukerroin on 0,45 ja ShotPeened-pintakäsittelykerroin on 1,4. Näillä arvoilla väsymislajuuden korjauskertoimeksi saadaan 0,63.

Kuvassa 9.26 on positio #6 kuormitushistorian mukaan lasketut vaurio- ja rainflow-histogrammit 64:ään jännitysamplitudi- ja keskijännitysluokkaan jaettuna. Ylempänä olevassa vauriohistogrammissa pylvään korkeus kuvaa kyseisen jännitysamplitudin aiheuttamaa vaurion suuruutta (damage) kuormitushistorian mukaisella syklimäärällä, mikä lasketaan kaavalla 49.

$$Damage_i = \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (49)$$

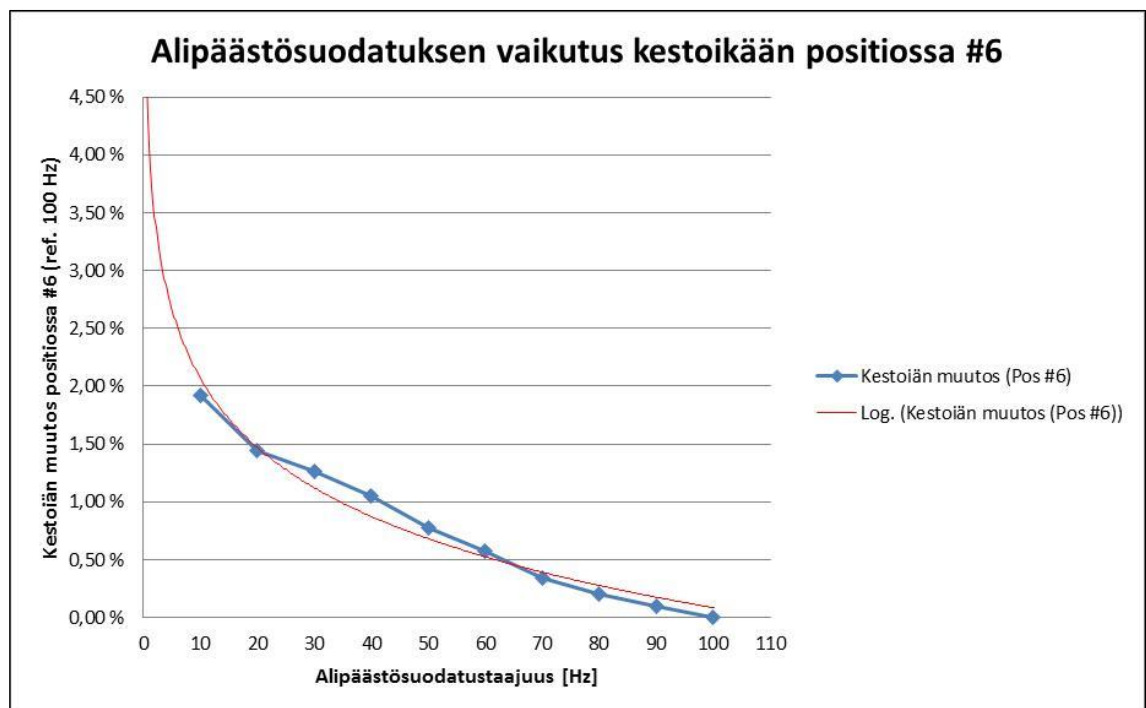
Alemmassa rainflow-histogrammissa pylvään korkeus kuvaa kyseisen jännitysvaihteluvälin (Range) toistojen määrää eli syklimäärää n_i tarkasteltavan kuormitushistorian aikana. Toisella vaakakselilla on esitetty kyseisen jännitysvaihteluvälin keskijännitys (Mean).



Kuva 9.26. Position #6 vaurio- ja rainflow – histogrammit 64:ään jännitysvaihteluväli- ja keskijännitysluokkaan jaettuna.

Seuraavaksi tarkasteltiin GW Stress Life – laskennan tuloksia kaikkien kahdeksan laskentakanavan osalta ja havaittiin, että positioissa 1-3 ja 7-8 kestoikä ylittää laskennan katkaisurajan. GW Stress Life – laskennan katkaisuraja (Beyond cut-off) on $N_{fc} = 10^{30}$, jonka ohjelma on määritellyt vastaamaan ääretöntä kestoikää. Kestoikälaskenta lopetetaan, kun kestoikä saavuttaa katkaisurajan. Positioiden 4-5 kestoiät jäivät puolestaan katkaisurajan alapuolelle ja näiden positioiden perusteella määräytyi koko runkosovituksen kestoikä.

Alipäästösuodatuksen taajuuden vaikutusta kestoikään arvioitiin suorittamalla Stress Life – laskenta eri alipäästösuodatustaajuuksilla ja taulukoimalla positio #6:n kestoikäarvot. Tämän jälkeen taulukoiduista arvoista laskettiin kestoiän muutos suhteessa 100 Hz:n suodatuksella laskettuun kestoikään ja muodostettiin kuvan 9.27 mukainen kuvaaja. Kuvaajassa Sininen käyrä kuvaa kestoiän muutosta suhteessa suodatustaajuuteen siten, että laskennallinen kestoikä kasvaa kun suodatustaajuutta pienennetään. Punainen käyrä on sinisen käyrän logaritminen trendikäyrä, mikä sisältää ennusteen välillä 0-10 Hz. Kuvaajan perusteella voitiin todeta, että alipäästösuodatuksen muutoksella 100 Hz:stä 20 Hz:iin ei ollut merkittävää vaikutusta laskettuun kestoikään, mutta alle 10 Hz:n suodatus johtaa epäluotettavaan laskentatulokseen. Näin ollen kestoikälaskennassa päätettiin käyttää 20 Hz:n alipäästösuodatusta.



Kuva 9.27. Alipäästösuodatuksen vaikutus kestoikään positiossa #6. Sininen käyrä kuvaa kestoiän muutosta ja punainen käyrä on sinisen käyrän logaritminen trendikäyrä, mikä sisältää ennusteen välillä 0-10 Hz.

Verrattaessa GlyphWorks Stress Life – laskennan tuloksia niin sanottuun manuaalisen excel-laskennan tuloksiin havaittiin, että tulokset olivat samaa suuruusluokkaa ja laskentamenetelmät ovat valituilla kertoimilla keskenään verrannollisia.

Laskennan tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan, mutta tulee huomioida, että tähän on päästiin lisäämällä Glyph Works – laskentaan kuulapuhallus (Shot Peened) pintakäsittelymenetelmä, mikä nostaa pintakäsittelykertoimen arvoa 40 %:lla. Toisaalta Glyph Works antaa valukappaleen pinnanlaatukertoimeksi (SurfaceFinish = Cast) arvon 0,45 (excel-laskennassa $C_{\sigma,R}=0,881$), kun materiaalina on GJS 500 Cast Iron, jonka murto-
lujuus on 579,45 MPa nCode_Premium.mxd – materiaalitietokannassa. Tämän lisäksi materiaalitietokannan S-N – käyrä ja sen kulmakertoimet poikkeavat hieman käsikaa-
voilla lasketusta S-N – käyrästä.

Näissä molemmissa kestoikälaskennoissa käytettyjä parametreja voidaan pitää hyvi-
nä lähtöparametreina jatkossa tehtäville kestoikälaskelmille ja analyyseille. Merkittä-
vimmat vaikutukset kestoikälaskennan tuloksiin S-N – käyrän lisäksi on parametreilla
K_f, SurfaceFinish ja SurfaceTreatment, jos luotettavuuskerroin pidetään vakiona eli
97,5 %:n mukaisena.

Glyph Works Stress Life – laskentaa voidaan käytännössä tarkentaa hakemalla ker-
toimille K_f tai SurfaceFinish sopivat kokeelliset arvot. Jos laskennan tarkentaminen ha-
lutaan tehdä kertoimen K_f avulla, niin pinnanlaatuparametrin SurfaceFinish arvoksi
kannattaa valita Polished (kiillotettu), joka asettaa pinnanlaatukertoimeksi 1,0. Tällöin
myös pintakäsittelyparametrin SurfaceTreatment arvoksi kannattaa valita None (ei pin-
takäsittelyä), joka asettaa pintakäsittelykertoimeksi 1,0. Näin väsymislujuuden korjaus-
kertoimen K_f määrittäminen yksinkertaistuu ja sen vaikutus laskennalliseen kestoikään
säilyy loogisena.

9.4 Tietämyskannan tietojen päivitys

Tuotesuunnittelun validointiprosessin vuokaavioissa kuvissa 6.1 ja 8.1 (liite 1) on kuvattu tiedon siirto molempiin suuntiin sekä tuotemallin analysoinnin ja tietämyskannan että validointitestauksen ja tietämyskannan välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että tietämyskannasta hyödynnettävää tietoa tulee päivittää tuotemallin analysoinnissa ja validointitestauksessa hankitulla uusimmalla tiedolla. Tämän tutkimuksen yhteydessä kerättyä tietoa tullaan hyödyntämään FEA-laskentamallin ja monikappalesimulointimallin tarkentamisessa, jolloin niihin liittyvät tiedot tietämyskannassa päivittyvät.

Edellä mainittujen lisäksi tietämyskannassa olevan testispesifikaation päivitystarpeen kartoittamiseksi laboratorio- ja kenttätestin mittaustuloksia verrattiin lopuksi myös luvussa 8.3.1 kuvatun laboratoriotestin spesifikaatioon. Aikaisempiin havaintoihin pohjautuen tutkittavaksi alueeksi valittiin runkosovitteen positiot #1 ja #2. Kuvassa 9.28 on venymäliuska positiossa #1 kiinnitettynä hieman etukuormaimen kiinnityskohdan alapuolelle niin lähelle kuormaimen rakennetta kuin mahdollista.

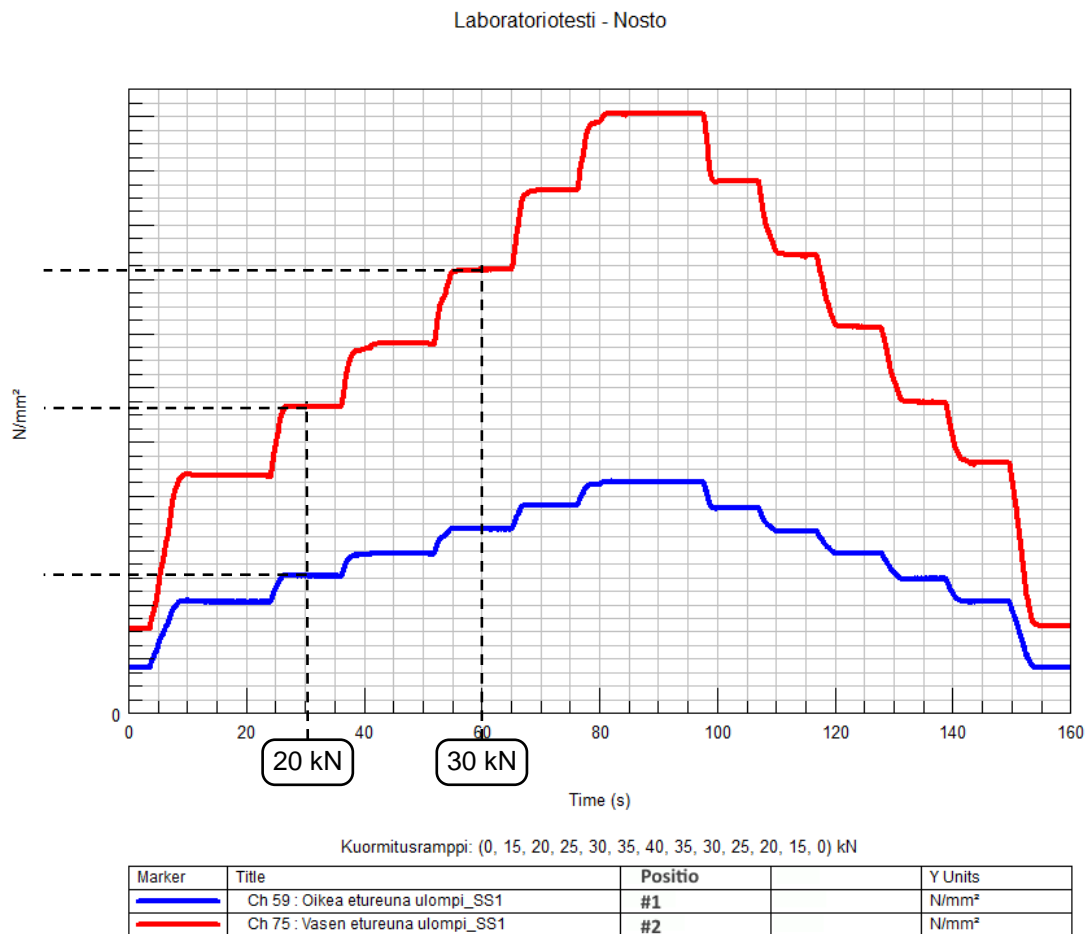


Kuva 9.28. Venymäliuska positiossa #1.

Kenttätestissä etukuormaimen kuorma muodostui testissä käytetyn kauhan ja hiekan yhteismassasta, jonka arvioitiin olevan noin 1800 kg ja, josta aiheutui noin 20 kN:n pystysuuntainen staattinen voima traktorin ollessa paikallaan. Runkosovitteisiin kohdistuva dynaaminen kuormitus syntyi etukuormaimella tehdystä työstä ja kuorman liikuttamisesta traktorin avulla. Suurimman valittavissa olevan etukuormaimen nostokapasiteetti on 2120 kg (@ 195 bar, 800 mm from pivot pin, max. lift height), joten kauhan ja hiekan yhteismassan aiheuttama 1800 kg:n kuormitus on noin 85 % nostokapasiteetista.

Positioiden #1 ja #2 jännitykset eivät aiheuttaneet Stress Life – kestoikälaskennan perusteella rikkoontumiseen johtavaa vauriota. Stress Life – laskennan perusteella positioissa #1 tai #2 ei tapahdu vaurioitumista, vaikka kyseisten jännitykset skaalattiin kertoimella $1/0,85$ vastaamaan 100 %:n kuormitusta nostokapasiteetista. Kun jännitykset skaalattiin vastaamaan 150 %:n kuormitusta nostokapasiteetista, niin kestoiäksi positioissa #1 ja #2 saatiin noin 9000 tuntia. Kestoikälaskennan perusteella 150 % skaalattu kuormitus ei ole kuitenkaan enää realistinen sillä positiossa #6 runkosovite rikkoontuu Stress Life – laskennan mukaan heti ensimmäisen työsyklin aikana.

Testispesifikaation päivitystarpeen kartoittamista varten kenttätestissä saatuja venymämittaustuloksia verrattiin myös laboratoriossa tehtyihin mittauksiin. Laboratoriossa tehdyissä venymäliuskamittauksissa jännitykset vaihtelivat positioissa #1 ja #2 kuvan 9.29 mukaisesti, kun kuormainta kuormitettiin kuvan 9.2 mukaisesti pystysuuntaisella epäkeskeisellä voimalla, jota muutettiin 5 kN:n askelin välillä 0 – 40 kN. Verrattaessa kauhahan ja hiekan yhteismassaa vastaavalla staattisella 20 kN:n voimalla kuormitettaessa syntyneitä jännityksiä positiossa #1 ja #2 havaittiin, että kenttätestissä dynaaminen kuormitus aiheutti positio #1:een maksimissaan noin 60 MPa suuremman jännityksen. Sama jännitystaso saatiin aikaan laboratorion kuormituspenkissä runkosovitepositioon #2 noin 30 kN:n staattisella voimalla kuormitettaessa.



Kuva 9.29. Maksimipääjännitykset positioissa #1 ja #2 laboratoriotestin pystysuuntaisen kuormitusrampin aikana.

Kaavalla 27 laskettua väsymisrajaa 126 MPa verrattiin seuraavaksi laboratoriotestin mittaustuloksiin positioissa #1 ja #2. Puskutestin mittaustuloksista havaittiin, että väsymisrajan ylittämiseen tarvittiin 75 kN:n voima ja nostotestissä väsymisraja ylitettiin puolestaan 25 kN:n voimalla kuormitettaessa. Leen (2012) mukaan kaavalla 27 lasketun väsymisrajan alapuoliset jännitykset eivät aiheuta vauriota ellei sitä ennen ole syntynyt

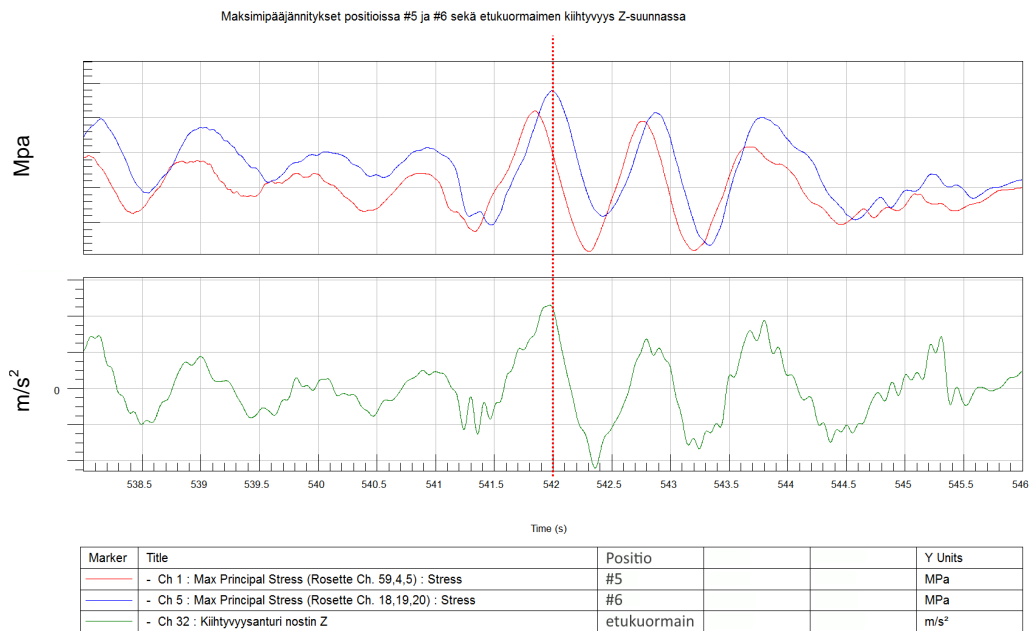
paikallisia myötörajan ylittäviä jännityksiä (local yielding). Jos testispesifikaatiota tarkasteltaisiin ainoastaan runkosovitepositioiden #1 ja #2 näkökulmasta, laskennassa käytetyn teorian mukaan nostotestin kahden pienimmän voiman ja puskutestin pienimmän voiman mukaan tehdyt kuormitukset ovat merkityksettömiä ja ne voitaisiin poistaa testin alusta. Toisaalta kenttätestin venymäliuskamittausten perusteella runkosovitteiden rasitetuin kohta oli positioissa #5 tai #6, joten testispesifikaation päivitystä varten jännitysajakauma tulee tarkastaa koko sovitteen osalta tarkennetun FEA-mallin avulla.

Etukuormaimen sivuttaissuuntaisen kuormituksen merkitystä runkosovitteiden jännityksiin arvioitiin etukuormaimen värähtelyn y-suuntaisten kiihtyvyyksien avulla. Kuvassa 9.30 on merkitty punaisilla nuolilla kolmen suurimman kiihtyvyyden esiintymiskohdat ylimmäisessä kuvaajassa olevasta kiihtyvyyden kuvaajasta tarkasteltuna. Keskellä olevassa kuvaajassa on esitetty positio #6:n maksimipääjännityksen ja alimmaisessa kuvaajassa ajonopeuden vaihtelu. Työsyklin vaiheet, jotka on merkitty kaarisulkein aika-akselin alapuolelle, ovat samoja kuin kuvassa 9.23. Kiihtyvyyden- ja jännitysdata on käsitelty 20 Hz:n alipäästösuodattimella.



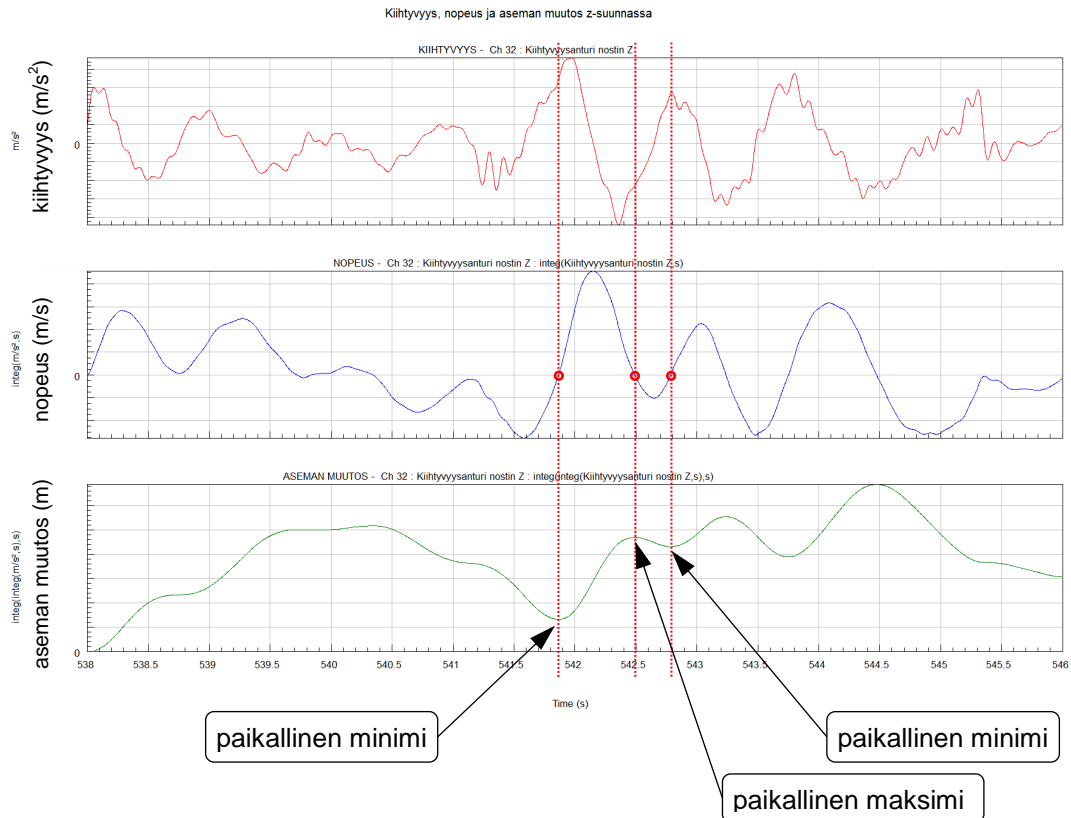
Kuva 9.30. Etukuormaimen värähtelyn kiihtyvyyden y-suunnassa eli sivuttaissuunnassa aikajaksolla 478-546 sekuntia. Ylimmäisessä kuvaajassa y-suuntainen kiihtyvyys, keskellä maksimipääjännitykset positioissa #6 ja alimmaisessa kuvaajassa ajonopeus. Punaisilla nuolilla on merkitty kolmen suurimman kiihtyvyyden esiintymiskohdat.

Jännityskuvaajan perusteella havaittiin, että siirtoajon aikana 517 ja 532 sekunnin kohdalla syntyneiden sivuttaiskiihtyvyyksien vaikutus runkosovitteen jännityksiin oli hyvin vähäinen. Siirtoajon loppuvaiheessa 542 sekunnin kohdalla oli tilanne, jossa kauha oli yläasennossa täynnä hiekkaa valmiina kauhan tyhjennykseen. Tällöin sivuttaiskiihtyvyyden maksimiarvo ja suuri jännityksen muutos ajoittuivat samalle ajanhetkelle. Kun verrattiin positioiden #5 ja #6 maksimipääjännityksiä ja y-suuntaisia kiihtyvyyksiä keskenään havaittiin, että myöskään ajan hetkellä 542 sekuntia esiintyneellä y-suuntaisella kiihtyvyydellä ei ollut merkittävää vaikutusta runkosovitteen jännityksiin. Sen sijaan kuvan 9.31 jännitys- ja kiihtyvyyksikuvaajia vertaamalla havaittiin, että z-suuntaisella kiihtyvyydellä on selkeä korrelaatio runkosovitteen jännityksiin.



Kuva 9.31. Runkosovitteen maksimipääjännitykset positioissa #5 ja #6 sekä etukuormaimen värähtelyn kiihtyvyys z-suunnassa aikajaksolla 538-546 sekuntia.

Edellä mainitun havainnon varmistamiseksi muodostettiin hetkellisen asemanmuutoksen kuvaaja, joka saatiin integroimalla kiihtyvyydata ajan suhteen kahteen kertaan. Kuvassa 9.32 on esitetty z-suuntainen kiihtyvyydata sekä sen integroinnin tuloksena syntyneet hetkellisen nopeuden ja asemanmuutoksen kuvaajat. Keskellä olevaan nopeuskuvaajaan on merkitty ympyröin kolme hetkellisen nopeuden nollakohtaa ja niitä vastaavien asemanmuutosten paikalliset minimi- ja maksimikohdat on merkitty alimpana olevaan asemanmuutoskuvaajaan.



Kuva 9.32. Etukuormaimen hetkellinen kiihtyvyys, nopeus ja aseman muutos z-suunnassa aikajaksolla 538-546 sekuntia. Nopeus on saatu kiihtyvyydataan integroinnilla ajan suhteen, jota edelleen integroimalla on saatu aseman muutos.

Asemanmuutoskuvaajasta havaittiin, että paikalliset minimi- ja maksimikohdat vastaavat hyvin runkosovitteen jännitysvaihteluita ja rakenteen oletettuja joustoja. Näin ollen runkosovitteen jännitysvaihteluiden todettiin johtuvan vaiheiden B ja C aikana pääasiassa z-suuntaisista kiihtyvyyksistä eikä testispesifikaatioon ole tämän perusteella tarvetta lisätä y-suuntaista kuormitusta. Y-suuntaisten kiihtyvyyksien merkitystä jännityksiin olisi hyvä tarkastella jatkossa etukuormaimella tehtävän auraustyön yhteydessä, jolloin kuormaimen kohdistuu oletettavasti suurempia sivuttaisvoimia.

Yhteenveto venymämittauksista

Testeissä käytetyn etukuormaimen nostokapasiteetti on 2120 kg, joten kauhan ja hiekan yhteispainon aiheuttama 1800 kg:n kuormitus oli noin 85 % nostokapasiteetista. Venymäliuskamittauksen perusteella kuormaimen sovitteiden rasitetuin kohta oli positiossa #5/#6, jonka perusteella sovitteen kestoikä määräytyi. Kestoikälaskennan perusteella kuormaimen sovitteet täyttävät niille asetetun kestoikätaavoitteen.

Rakenteessa saattaa ilmetä myös paikallisia jännityskeskittymiä esimerkiksi kuormaimen tukipisteenä toimivan levyn aiheuttamasta reunapuristuksesta johtuen. Jos reunapuristus on hyvin suuri, niin se voi aiheuttaa tukipisteen pinnan myötämisen ja muodostaa murtumiseen johtavan alkusärön. Tämän tyyppistä vaurioitumista voidaan arvioida murtumismekaniikan särönkasvulaskennan avulla, mutta aiheen käsittely on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Kaikkia vaurioitumistyyppisiä ei pystytä ennakoimaan ennen fyysistä testausta pelkästään staattisen FEA-laskennan avulla vaan siihen tarvitaan 3D-geometriaan pohjautuva kestoikälaskentamalli, jonka kuormitushistoria perustuu fyysisen testin tai luotettavan virtuaalitestin mittausdataan. Suunnitteluparametrit, kuten maksimi nostokapasiteetti, toimivat hyvinä lähtöarvoina testidatan puuttuessa, mutta niiden perusteella ei voida luotettavasti arvioida kestoikää HCF-alueella eikä sen perusteella voida määrittellä luotettavasti käytönaikaisia kuormituksia tai kuormitussuuntia.

Tehtyjen mittausten perusteella laboratoriotestissä havaittiin eräitä tarkennusta vaativia seikkoja ja testispesifikaatioon tulisi tehdä muutamia päivityksiä kuten esimerkiksi kuormitusprofiilin säätäminen todellisessa käytössä syntyvien kuormitusten tasolle. Testispesifikaation päivitystä varten tulisi tehdä lisätutkimus sivuttaissuuntaisten kuormitusten merkityksestä rasitukseen sekä nopeutetun testauksen kuormitusprofiilin uudelleenmäärittäminen venymämittauksiin pohjautuen.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

10.1 Tuotesuunnittelun validointiprosessi

Tavoitteena oli laatia järjestelmällinen traktorin tuotesuunnittelun validointiprosessi, jossa otettaisiin huomioon nykyaikaisten simulointijärjestelmien tehokkaampi hyödyntäminen. Tavoitteet saavutettiin syventymällä AGCO:n tuotteiden kehittämisessä käytettyyn vaihe-portti – prosessiin eli AMPIP2.1-prosessiin ja Design for Six Sigma – menetelmään, joiden pohjalta muodostettiin liitteen 1 mukainen traktorin tuotesuunnittelun validointi – prosessikaavio. Traktorin tuotesuunnittelun validoinnin vaiheet ja työkalut kuvattiin Design for Six Sigman teorian pohjalta ja niiden merkitys tuotesuunnitteluun tuotiin esiin konkreettisen esimerkkitapauksen avulla.

Tuotesuunnittelun näkökulmasta AMPIP2.1-prosessin vaiheissa 1-3 kuvattu suunnittelun verifiointitestaus (Design Verification Plan) on sisällöltään hyvin lähellä tässä työssä kuvattua tuotemallin analysointia. AMPIP2.1-prosessin vaihe 4 vastaa puolestaan tässä työssä kuvattua validointitestausta. Validointitoiminnan suunnittelussa sekä tuotemallin analysointi että validointitestaus tulisi ottaa huomioon yhtä aikaa. Näin menetellen nähdään esimerkiksi se, että tarvitaanko simulointimallien tarkentamiseen lisää mittausdataa, jota olisi mahdollista kerätä tulevien validointitestien yhteydessä. Riittävän tarkan simulointimallin ja muiden tuotemallin analysointityökalujen avulla on mahdollista korvata fyysisellä prototyypillä tehtäviä validointitestejä ja näin ollen pienentää validointikustannuksia. Jotta tuotemallin analysointityökaluja voitaisiin pitää riittävän luotettavina, ne tulee vastaavasti verifioida fyysisten testien avulla, mikä voi vaatia ajoittain lisäpanostuksia esimerkiksi mittauksiin ja analysointiin normaalin validointitestauksen lisäksi.

Validointitoiminnan suunnittelussa tärkeimpänä ohjaavana tekijänä tulisi pitää ajatusta, että tuotesuunnittelun validointiprosessin keskeisin tehtävä on varmistaa, että suunniteltu valmis tuote täyttää kaikki tuotespesifikaation asettamat vaatimukset. Tämä periaate puolestaan edellyttää, että konseptin tuotespesifikaatio on määritelty riittävän yksityiskohtaisella ja teknisellä tasolla.

10.2 Esimerkitapaus

Esimerkitapauksen käsittelyn tavoitteena oli havainnollistaa traktorin tuotesuunnittelun validointiprosessin vaiheita sekä kartoittaa kohteet, joiden avulla validointitoimintaa voitaisiin jatkossa suorittaa tehokkaammin muun muassa simulointi- ja analysointityökaluja hyödyntäen. Esimerkitapauksen perusteella havaittiin, että vaatimuslistan luominen tarkasteltavan systeemin, alisysteemin tai komponentin näkökulmasta helpottaa huomattavasti validointisuunnitelman tekemistä ja se luo pohjan systemaattiselle validointiprosessille ja lisäksi siitä on apua myös resurssisuunnittelussa sekä tehtävien priorisoinnissa. Lisäksi havaittiin, että suunnitteluvaatimusten analysoinnin kannalta konseptin tuotespesifikaatioon tulisi lisätä yksityiskohtaisempaa tietoa tuotteelle asetetuista vaatimuksista ja ne olisi hyvä ryhmitellä validointisuunnitelmaa varten suunnitteluvaatimusten analysoinnissa esitettyjen otsikoiden mukaisesti.

Validointisuunnitelman muodostamisen yhteydessä havaittiin, että luotettavuusvaatimusten validointia varten tarvittiin lisätietoa rakenteen todellisista rasituksista ja niitä päätettiin kerätä venymä-, paine- ja kiihtyvyyssmittausten avulla. Kerätyn datan avulla saatiin muodostettua aineistoa, jolla simulointi- ja analysointityökalujen tarkkuutta pystytään jatkossa parantamaan ja, minkä johdosta myös validointitoiminta tulee tehostumaan. Venymädatan avulla saatiin selville FEA-mallin tulosten taso suhteessa laboratorio- ja kenttätestien tuloksiin, minkä perusteella FEA-mallia päätettiin tarkentaa tuomalla malliin lisää osien 3D-malleja ja tekemällä muutoksia komponenttien välisiin rajoiteehtoihin. Lisäksi venymädataa hyödynnettiin kestoikälaskennan matemaattisen mallin luomiseen ja Glyph Works Stress Life –kestoikälaskentaan, joiden tulosten avulla voitiin arvioida runkosovitteen kestoikää sekä laboratoriotestin spesifikaation päivitystarpeita. Kiihtyvyydatasta muodostettujen PSD- ja RMS-kuvaajien avulla voitiin todeta, että monikappalesimulointimalli kuvaa melko hyvin fyysisen traktorin käyttäytymistä ja näiden kuvaajien avulla simulointimallia voidaan jalostaa jatkossa yhä realistisemmaksi.

Tarkoistakin simulointimalleista huolimatta fyysisiä validointitestejä tarvitaan kuitenkin aina, jotta voidaan olla varmoja tuotteen toiminnasta todellisissa käyttöolosuhteissa sillä kaikkia asioita ei ole mahdollista ennakoida tai simuloida. Tuotesuunnittelun validointi on iteratiivinen prosessi, jonka toiminnan tehokkuuden mittarina voidaan pitää validoinnin sykliä ja tarvittavien syklien määrää sekä validoinnin kokonaiskustannuksia.

11 JATKOTOIMENPITEET

Tuotesuunnittelun validointiprosessin sujuvuuden parantamiseksi tuotespesifikaation sisältöä tulisi tarkentaa sellaiselle tasolle, että sen pohjalta on mahdollista luoda selkeä ja riittävän tarkka systeemitason vaatimuslista. Ideaalitulanteessa systeemitason vaatimuslista on riittävän tarkka silloin, kun suoraan sen pohjalta voidaan johtaa vaatimuslistat aina alisysteemi- ja komponenttitasoille saakka. Suunnitteluvaatimusten analysoinnin ja validointitoiminnan suunnittelun kannalta olisi hyvä, jos jo tuotespesifikaation sisältö ryhmiteltäisiin suunnitteluvaatimusten analysoinnissa esitettyjen otsikoiden mukaisesti.

Lisäämällä tietokoneavusteista virtuaalitestausta ja simulointia voidaan osa validoinnin tehtävistä suorittaa jo hyvin aikaisessa vaiheessa tuotekehitysprosessia ja näin saadaan pienennettyä sekä tarvittavien suunnittelukierrosten että fyysisten prototyyppien määrää. Virtuaalitestauksen ja simuloinnin lisääminen on mahdollista, jos ne otetaan huomioon validointitoiminnan suunnitteluvaiheessa ja niiden tarkentamiseen vaadittavaa informaatiota kerätään systemaattisesti fyysisillä prototyypeillä suoritettavien testien yhteydessä.

Tässä tutkimuksessa käytettyjen kestoikälaskentamenetelmien parametreja voidaan pitää hyvinä lähtöarvoina jatkossa tehtäville kestoikälaskelmille. Kestoikälaskennan luotettavuuden parantamiseksi tulisi venymämittausdataa kerätä myös muista etukuorimaimella suoritettavista työtehtävistä kattavan kuormitusprofiilin luomiseksi. Laskentaparametrien, kuten murtolujuus, pinnanlaatu- ja pintakäsittelykerroin, tarkempaa määrittämistä varten tulisi suorittaa tarvittavat materiaalitestit todellista runkosovitemateriaalia käyttäen.

Tietämuskannasta hyödynnettävää tietoa tulee päivittää aina tuotemallin analysoinnissa ja validointitestauksessa hankitulla uusimmalla tiedolla, jolloin uusin tieto on nopeasti hyödynnettävissä myös seuraavissa tuotekehitysprojekteissa.

LÄHTEET

AGCO. 2014. AGCO. [intranet AGCO]. [viitattu 9.10.2014]. Ainoastaan AGCO:n sisäiseen käyttöön.

Haibach, E. 2003. FKM-guideline, Analytical strength assessment of components in mechanical engineering. 5th rev. ed. English version. Frankfurt/Main, Forschungskuratorium Maschinenebau (FKM). 267 p.

ISO 5008. 1979. Agricultural wheeled tractors and field machinery, Measurement of whole-body vibration of the operator. International Organization for Standardization.

Jokinen, T. 2001. Tuotekehitys. 6. painos. [WWW]. [viitattu 29.9.2014]. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Reports/2010/isbn9789526033204.pdf>

Lee, Y., Barkley, M., Kang, H. 2012. Metal Fatigue Analysis Handbook, Practical Problem-Solving Techniques for Computer-Aided Engineering. 1. painos. Waltham, Massachusetts. Elsevier. 580 s.

MTT. Tarkastus ja sertifiointi [WWW]. [viitattu 30.9.2014]. Saatavissa: <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/mtt/palveluttuotteet/testausjakehittamispalvelut/mittausjastandardisointipalvelut/tarkastusjasertifiointi>.

Norton, R. 2006. Machine Design, An Integrated Approach. 3. painos. Upper Saddle River, New Jersey, Pearson Education. 984 s.

Salmi, T., Virtanen, S. 2006. Dynamiikka. 1. painos. Tampere. Pressus Oy. 480 s.

Siemens. LMS Imagine.Lab Amesim Brochure [WWW]. [viitattu 30.10.2014]. Saatavissa: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/ImagineLab/amesim/index.shtml.

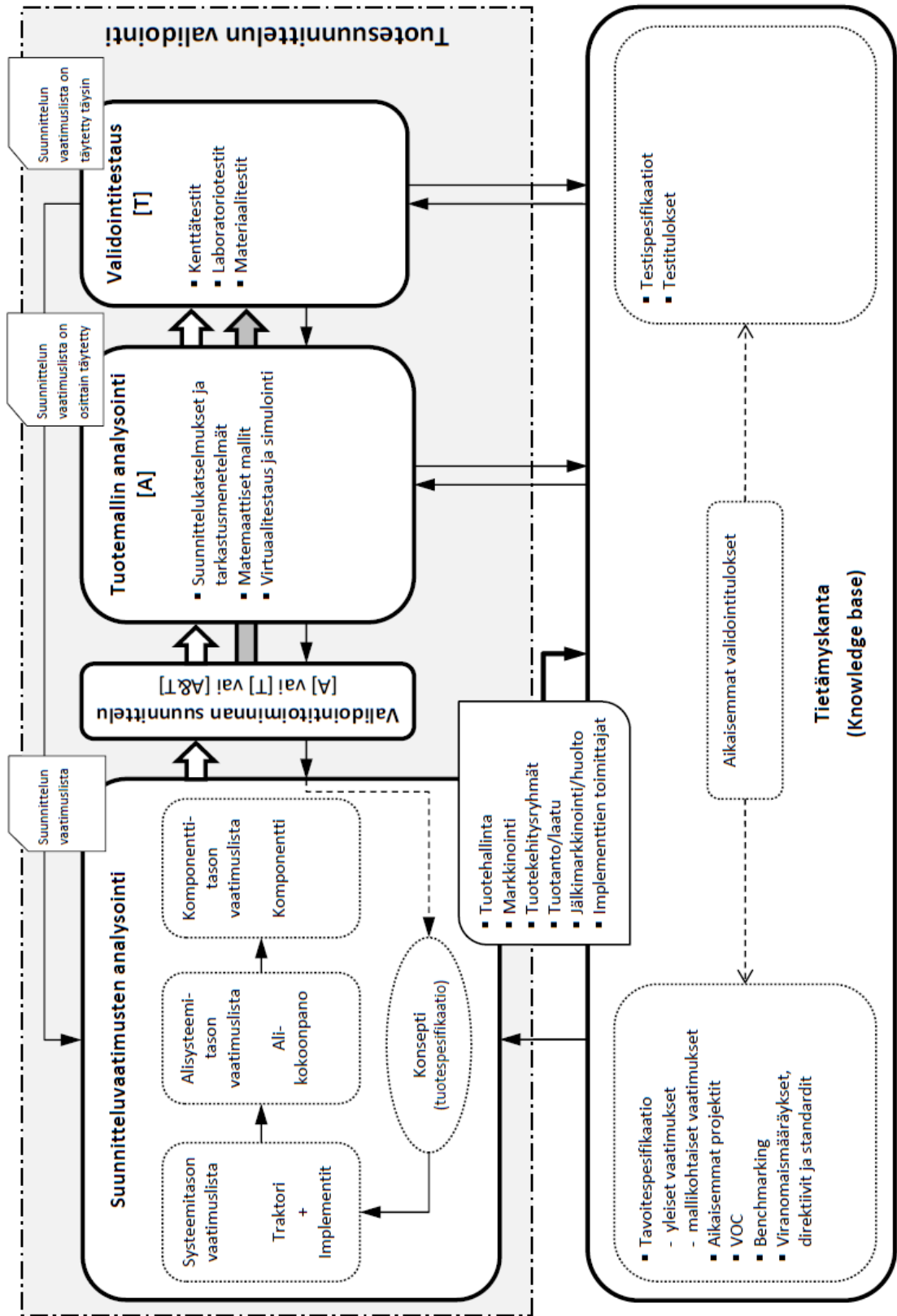
Valtra Oy Ab. Tietoa Valtrasta [WWW]. [viitattu 9.10.2014]. Saatavissa: <http://www.valtra.fi/tietoa-valtrasta.aspx>.

Watson, G. 2005. Design for Six Sigma, Innovation for Enhanced Competitiveness. 1. painos. Salem, New Hampshire, GOAL/QPC. 396 s.

Yang, K., El-Haik, B. 2009. Design for Six Sigma, A Roadmap for Product Development. Second Edition. USA. McGraw-Hill Professional. 741 s.

Zwillinger, D. 2002. CRC Standard Mathematical Tables and Formulae, 31st Edition. Chapman and Hall/CRC. 910 s.

LIITE 1: TUOTESUUNNITTELUN VALIDOINTIPROSESSIKAAVIO



LIITE 2: RUNKOSOVITTEEN VAATIMUSLISTA

| A | Toiminnallisen suorituskyvyn vaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
|-----|---|--|-----------|-----------------------|--|--|
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| A.1 | Runkosovitteet eivät saa heikentää traktorin suorituskykyä (ketteryys, näkyvyys jne.) | | V-4 | A | CAD/CAE - työkalut, suunnittelukatselmuks | |
| B | Käyttöympäristön asettamat vaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| B.1 | Käyttölämpötila | -40.. +50 °C | V-1 | A | Tietämyskanta / materiaalin ja pintakäsittelyn valinta | |
| B.2 | Suhteellinen ilmankosteus | 0.. ..100 % | V-2 | A | Tietämyskanta / materiaalin ja pintakäsittelyn valinta | |
| B.3 | Kemikaalien kesto Asteikko: erittäin hyvä, hyvä, tyydyttävä - Roiskevesi, makea: HYVÄ - Roiskevesi, suolainen: TYYDYTTÄVÄ - Öljyt: ERITTÄIN HYVÄ - Rasvat: ERITTÄIN HYVÄ - Hapot: TYYDYTTÄVÄ - Emäkset: TYYDYTTÄVÄ | | V-3 | A | Tietämyskanta / materiaalin ja pintakäsittelyn valinta | |
| B.4 | Runkosovitteet eivät saa kerätä likaa ja ne tulee olla helposti puhdistettavissa | | T-1 | A&T | CAD/CAE - työkalut, suunnittelukatselmuks | Prototyypin kenttättestaus |
| C | Luotettavuusvaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| C.1 | Suunniteltu kestoikä tavanomaisessa käytössä | | K-6 | A&T | Matemaattiset mallit, CAD/CAE-työkalut (MBS, FEA) | Prototyypin laboratorio- ja kenttättestaus |
| C.2 | Runkosovitteeseen ei saa syntyä merkittäviä muodonmuutoksia tavanomaisessa käytössä | | K-7 | A&T | Matemaattiset mallit, CAD/CAE-työkalut (MBS, FEA) | Prototyypin laboratorio- ja kenttättestaus |
| D | Käyttövaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| D.1 | Runkosovitteen tulee kestää tavanomaisesta työstä syntyvät rasitukset seuraavilla etukuormaimilla työskentellessä: | V45, V49, V55, V65 | K-8 | A&T | Matemaattiset mallit, CAD/CAE-työkalut (MBS, FEA) | Prototyypin laboratorio- ja kenttättestaus |
| E | Turvallisuusvaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| E.1 | Viranomaismääräykset | CE-merkintä | K-1 | A&T | Suunnittelukatselmuks | Prototyypin laboratorio- ja kenttättestaus |
| E.2 | Standardit | | K-2 | A | Suunnittelukatselmuks | |
| E.3 | Valtran sisäiset standardit | | K-3 | A | Suunnittelukatselmuks | |
| F | Rajapinta- ja yhteensopivuusvaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| F.1 | Runkosovitteen tulee olla yhteensopiva seuraavien etukuormainten kanssa: | V45, V49, V55, V65 | K-4 | A | CAD/CAE - työkalut, suunnittelukatselmuks | |
| F.2 | Runkosovitteen tulee olla yhteensopiva seuraavien traktorin komponenttien kanssa: | moottori, öljypohja, vauhtipyörän-kotelo, renkaat, lokasuojat, ohjaamo | K-5 | A | CAD/CAE - työkalut, suunnittelukatselmuks | |
| G | Huolettavuusvaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| G.1 | Traktoriin tehtävien huoltotoimenpiteiden tekeminen tulee olla mahdollista ilman runkosovitteiden irrottamista | | K-9 | A | CAD/CAE - työkalut, suunnittelukatselmuks | |
| H | Kustannusvaatimukset | | | Validointisuunnitelma | | |
| | VAATIMUS | Määre tai arvoalue | Painoarvo | Validointi | Tuotemallin analysointimenetelmät | Validointitestausmenetelmät |
| H.1 | Runkosoviteparin (vasen + oikea) kustannukset saavat olla enintään: | 20 % etukuormaimen hankintahinnasta | V-5 | A | Matemaattiset mallit / tuotekustannuslaskenta | |

LIITE 3: KUVA RUNKOSOVITTEESTA