

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Tapio Kurki

Virtuaalimallin hyödyntäminen harvesteripään tuotekehityksessä

Diplomityö

2012

84 sivua, 43 kuvaa, 8 taulukkoa ja 8 liitettä

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: Metsäkone; harvesteripää; virtuaalimalli; pituusmittaus; puoliempiirinen mallinnus

Keywords: Forest machine; harvester head; virtual model; length measuring; semi-empirical modeling

Virtuaalimallinnuksella tarkoitetaan koneen simulointia, jossa huomioidaan koneen mekaniikka, toimilaitteet ja ohjausjärjestelmä. Työn tavoitteena oli luoda virtuaalimalli harvesteripäästä. Kyseinen virtuaalimalli sisälsi harvesteripään tärkeimmät mekaaniset osat, pituusmittalaitteen hydraulikkapiirin ja tämän ohjauksen. Luodussa virtuaalimallissa huomioitiin myös harvesteripään ja puun väliset kontaktit. Lisäksi työssä tutkittiin mahdollista virtuaalimallinnuksen implementoimista osaksi yrityksen tuotekehitysprosessia.

Työssä suoritettiin verifiointimittaukset pituusmittalaitteen hydraulikkapiirille sekä virtuaalimallin hydraulikkakomponentit parametrisoitiin. Mittauksista saatuja tuloksia verrattiin virtuaalimallista saatuihin tuloksiin. Työssä esitellään myös ehdotus kuinka virtuaalimallinnusta kannattaisi hyödyntää osana yrityksen tuotekehitysprosessia.

Virtuaalimallin eri osa-alueilla saavutetut tulokset osoittavat, että virtuaalimallinnuksen hyödyntäminen tuotekehitysprosessin aikana mahdollistaa harvesteripään toimintojen tarkastelun ennen prototyypin rakentamista ja testaamista. Lisäksi hydraulikkapiirin parametrisoimisella pystytään tutkimaan parametrien vaikutusta kokonaisuuteen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Mechanical Engineering

Tapio Kurki

Utilization of a virtual model in harvester head's product development

Master's thesis

2012

84 pages, 43 figures, 8 tables and 8 appendices

Examiners: Professor Aki Mikkola
D.Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: Forest machine: harvester head; virtual model; length measuring; semi-empirical modeling

When modeling mechanics, actuators and the control system of a machine, is this kind of modeling called as virtual modeling. The main objective of this thesis was to create a virtual model of a harvester head. The virtual model included the most important mechanical parts, and the hydraulic circuit of length measuring device, and also the guidance system of the hydraulic circuit. Contacts between harvester head and tree were also noted in the virtual model. Implementation of virtual modeling as a part of company's product development process was also under investigation in this thesis.

Verification measurements were carried out for the hydraulic circuit of the length measuring device. Also the components of the hydraulic circuit were created for parametrization. The results from the verification measurements were compared to the results from the virtual model. Also a suggestion for the utilization of virtual modeling as a part of product development process is presented in the thesis.

The achieved results from different fields of the virtual model indicates that the usage of virtual modeling as a tool during product development process makes it possible to examine the harvester head functions before building the first prototype and testing it. Also the parametrization of the hydraulic circuit allows to examine the reactions of a virtual model, when different hydraulic parameters are be used.

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	1
1.1	Työn tavoitteet.....	2
1.2	Työn rajaus	3
2	TUOTEKEHITYSPROSESSIN KUVAUS	4
2.1	Järjestelmällinen tuotekehitys	6
2.1.1	Tehtävänasettelu ja luonnostelu	8
2.1.2	Jatkokehittely ja viimeistely.....	10
2.1.3	Prototypointi ja esisarjat	11
2.2	Mekatroninen lähestymistapa tuotekehityksessä.....	14
2.2.1	Automaatio ja ohjaus	16
2.2.2	Mekatronisen prosessin mittaus	17
2.3	Kontaktien mallinnus mekaanisissa järjestelmissä.....	18
2.3.1	Rangaistusmenetelmä	19
2.3.2	Rajoiteyhtälöt	20
2.3.3	Sysäyskertoimet.....	21
3	VIRTUAALIMALLINNUS OSANA TUOTEKEHITYSPROSESSIA	24
3.1	Uustuotesuunnittelu	24
3.2	Ylläpitosuunnittelu	27
3.3	Tuotteen verifiointi ja validointi.....	29
3.4	Virtuaalimallinnus prosessina	31
4	HARVESTERIPÄÄN VIRTUAALIMALLI	36
4.1	Mekaniikkamalli.....	36
4.2	Kontaktit.....	39
4.3	Hydrauliikan mallinnus.....	42
4.3.1	Puoliempiirinen mallinnus	44
4.3.2	Komponenttien mallinnus puoliempiirisesti	45
4.3.3	Pituusmittalaitteen hydraulipiiri	57
4.4	Verifiointimittaukset.....	60
4.4.1	Mittauskohteet	61
4.4.2	Mittausjärjestelyt	64
4.5	Ohjausjärjestelmä	66
5	SAAVUTETUT TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	68
5.1	Virtuaalimallin verifiointi	68
5.2	Virtuaalimalli ja puun prosessointi.....	72
5.3	Virtuaalimallin mekaniikka, kontaktit ja ohjaus	76

5.4 Tulosten analysointi.....	77
6 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	81
LÄHDELUETTELO.....	82
LIITE I: Mittauskomponentit sylinterin pituudelle	
LIITE II: Virtuaalimallin hydrauliiikkapiirin parametrit	
LIITE III: Tulokset 40 bar:n painatuspaineella	
LIITE IV: Tulokset 60 bar:n painatuspaineella	
LIITE V: Tulokset 80 bar:n painatuspaineella	
LIITE VI: Tulokset 70 bar:n painatuspaineella ja paineakulla	
LIITE VII: Tulokset 80 bar:n painatuspaineella ja paineakulla	
LIITE VIII: Mittaustulos 70 bar:n painatuspaineella	

KÄYTETYT MERKINNÄT

Latinalaiset aakkoset

A	pinta-ala
\mathbf{A}	Kiertomatriisi
b	vaimennuskerroin
Be	puristuvuuskerroin
C	puoliempiirinen vakio
Cv	tilavuusvirtavakio
Cd	purkautumiskerroin
\mathbf{Cq}	Jacobian matriisi
D	halkaisija
e	sysäyskerroin
F	voima
k	jousivakio
K	kontaktin jäykkyys
L	pituus
m	massa
\mathbf{M}	massamatriisi
p	paine
\dot{p}	paineen 1. aikaderivaatta
P	teho
\ddot{q}	yleistettyjen koordinaattien kiihtyvyyssvektori
Q	vakiovektori
Q	tilavuusvirta

\dot{Q}	tilavuusvirran 1. aikaderivaatta
r	paikkavektori avaruudessa
R	paikkavektori
step5	jouheutusfunktio
t	aika
U	jännite
u, v	nopeus
\bar{u}	lokaalin koordinaatiston paikkavektori
V	tilavuus
x	asema
\dot{x}	nopeus
\ddot{x}	kiihtyvyys
y	tunkeuma, toleranssi

Kreikkalaiset aakkoset

α	karan viistekulma
Δ	ero/muutos
η	hyötysuhde
κ	adiabaattivakio
λ	Lagrangen vakio
μ	kitka
ρ	tiheys
τ	aikavakio

Yläindeksit

n	kerroin
T	Transpoosi

Alaindeksit

A	Venttiilin portti
accu	paineakku
B	Venttiilin portti
c	laminaarinen virtaus, rajoite
dyn	dynaaminen
e	ulkoinen voima
f1	nesteen virtaus
f2	nesteen suihkuaminen
gas	kaasu
gas0	kaasun alkutila
in	tulosuure
max	maksimi
nom	nominaalinen
oil	öljy
oil0	öljyn alkutila
p	pumppu, paine
P	syöttöpaineen portti
PAV	paineenalennusventtiili
PAV_1	1 kerroin paineenalennusventtiilille
PAV_2	2 kerroin paineenalennusventtiilille

PRV	paineenrajoitusventtiili
ref	referenssi
syl	sylinteri
T	tankin portti
v	neliöllinen nopeus, paineakun kuristin
vuoto_P	syöttöpaineportin vuoto
vuoto_T	tankkiportin vuoto
VVV_1	vastusvastaventtiilin 1. kuristin
VVV_2	vastusvastaventtiilin 2. kuristin

Lyhenteet

3D	kolmiulotteinen
CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (<i>computer aided design</i>)
DEM	diskreetti elementti menetelmä (<i>discrete element method</i>)
FEM	äärellisten elementtien menetelmä (<i>finite element method</i>)
MBD	monikappaledynamiikka (<i>multibody dynamics</i>)
MBS	monikappalesysteemi (<i>multibody system</i>)
VDI	saksalaisten insinöörien järjestö (<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>)

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Waratah OM Oy:lle ja työ on myös osa Tekes-projektia Koura 2015. Haluan kiittää ohjaajiani Jarko Malista ja Joni Turusta mahdollisuudesta tehdä tämä työ Waratah OM Oy:lle. Kiitokset Arto Alfthanille, Heikki Pyykölle, Samuli Jormanaiselle ja muulle Waratah OM Oy:n henkilökunnalle asiantuntemuksesta, opastuksesta ja avusta, jota olen saanut tämän työn aikana. Kiitokset myös John Deere Forestrylle ja Parker Hannifin Oy Lokomec:lle, joilta olen saanut tukea ja informaatiota työtäni varten.

Haluan kiittää erityisesti työni tarkastajia professori Aki Mikkolaa ja TkT Kimmo Kerkkäästä arvokkaista kommentteista ja opastuksesta, joiden avulla olen saanut työni näihin mustiin kansiin.

Suurimmat kiitokset osoitan vanhemmilleni, jotka ovat tukeneet minua opiskeluissani kaikkina näinä vuosina. Vastapainon tuomisesta opiskelulle kiitän sisaruksiani ja ystäviäni, joiden seurassa vapaa-aika on sujunut rattoisasti. Kiitos myös tyttöystävälleni, joka on kestänyt minua tämän prosessin aikana.

Joensuussa, 22.8.2012

Tapio Kurki

1 JOHDANTO

Mekatronisen koneen toimintojen tuntemisella sekä toimintoihin vaikuttavien ominaisuuksien tiedostamisella on merkittävä rooli tuotekehitysprosessissa. Hyödyntämällä esimerkiksi virtuaalimallinnusta tuotekehitysprosessin aikana voidaan tehostaa tätä prosessia. Virtuaalimallin osa-alueet voidaan karkeasti jakaa mekaniikka-, toimilaite- ja ohjausjärjestelmämalliin. Virtuaalimallinnuksella on lukuisia käyttökohteita, joista voidaan esimerkkinä mainita virtuaalimallien hyödyntäminen tutkittaessa toimilaitteiden ominaisuuksien vaikutusta koneen mekaanisten jäsenten dynamiikkaan.

Työ tehdään Waratah OM Oy:lle ja tämä työ on myös osa Tekes-projektia Koura 2015. Waratah OM Oy on John Deere Forestry Oy:n ja Outokummun Metalli Oy:n yhteisyritys, jonka päätoimialana on harvesteripäiden tuotekehitys ja valmistus. Waratah OM Oy toimittaa harvesteripäät John Deere -harvestereihin ja näin ollen yritystä voidaan pitää yhtenä John Deere Forestry:n merkittävimmistä alihankkijoista. Tekes-projektin tarkoituksena on harvesteripään kokonaistoiminnan optimointi. Harvesteripää on harvesterin olennaisin komponentti, jonka toiminta vaikuttaa eniten harvesterin tuottavuuteen, käyttöasteeseen, tehokkuuteen ja prosessoidun puun laatuun. Nämä vaatimukset jo yksinään asettavat merkittävät haasteet harvesteripään kehitystyössä. Virtuaalimallinnuksen kohteena tässä työssä on Waratah OM Oy:n suunnittelema ja valmistama H414 harvesteripää, joka on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. H414 harvesteripää. /1/

Virtuaalimallinnuksen sovittaminen osaksi tuotekehitysprosessia on olennaisimpia kysymyksiä, joihin tällä työllä haetaan vastauksia. Tämän työn tärkeimpänä tarkoituksena on myös kartoittaa, että kannattaako yrityksen käyttää resursseja virtuaalimallinnukseen. Mallinnuksen jakautuessa eri osa-alueille korostuu toimilaitteiden eli hydraulisten komponenttien mallinnuksen merkitys virtuaalimallissa.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän työn päätavoitteena on toimia yritykselle eräänlaisena kickoffina harvesteripään virtuaalimallinnuksessa ja samalla selvittää, voidaanko virtuaalimallinnusta hyödyntää mahdollisesti tulevaisuudessa osana yrityksen tuotekehitysprosessia. Ensimmäisenä tavoitteena on mallintaa Waratah OM Oy:n suunnitteleman ja valmistaman H414 harvesteripään pituusmittalaitteen hydraulikka ja tähän liittyvän mekaniikan dynamiikka hyödyntäen kaupallisia ohjelmistoja. Mallin avulla pyritään tutkimaan,

voidaanko hydrauliiikan mallinnuksella saada uutta informaatiota harvesteripäästä. Työssä suoritetaan myös mittauksia, joiden tuloksia käytetään apuna mallinnuksessa sekä mitattuja tuloksia verrataan mallinnoista saatuihin tuloksiin.

Toisena tavoitteena on perehtyä pituusmittalaitteen ja puun väliseen kontaktiin ja kuinka kyseinen kontakti mallinnetaan. Mittapyörän ja puun välisen kontaktin mallinnuksella on merkittävä vaikutus mittatarkkuuteen. Kontaktiin vaikuttaa myös kannatteluvoima, joka määrittää mekaniikan mallinnuksen yhteydessä. Kannatteluvoimalla tarkoitetaan tässä yhteydessä voimaa, jolla puu pysyy karsintaterien ja syöttörullien otteessa. Voima tuotetaan hydraulisilla toimilaitteilla, jotka karsintaterät ja syöttörullat välittävät puuhun painaen tämän harvesteripään runkoa vasten.

1.2 Työn rajaus

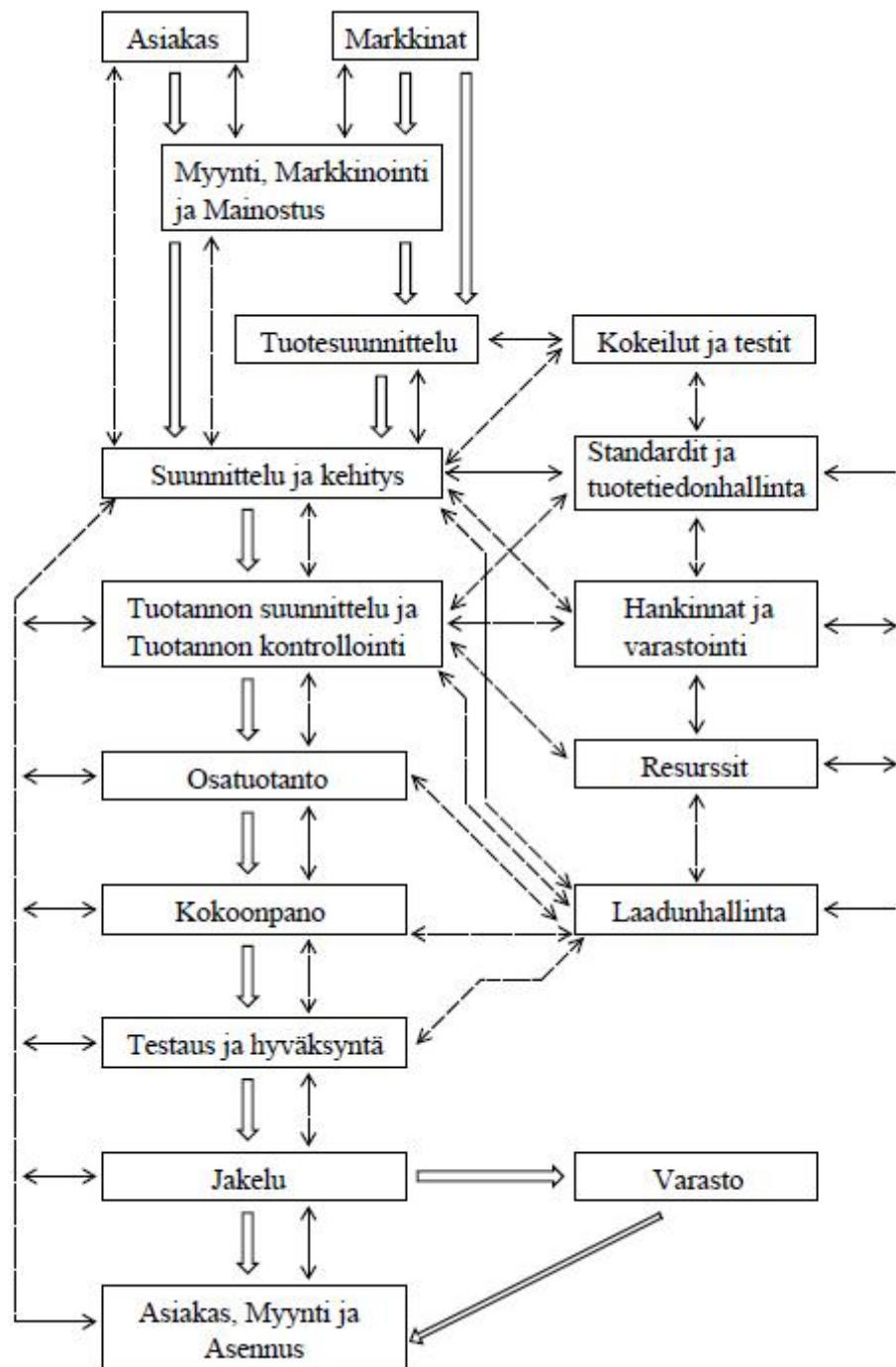
Harvesteripään toimilaitteiden mallinnuksessa pysytään ainoastaan pituusmittalaitteen mallinnuksessa. Tämä laite pyritään mallintamaan mahdollisimman tarkasti, mutta joitain yksinkertaistuksia mahdollisesti tullaan tekemään liittyen pituusmittalaitteen mekaniikan geometriaan. Tarkoilla yksityiskohdilla geometriassa on taipumus kasvattaa laskenta-aikaa eikä niiden poistolla ole suurta vaikutusta massa- ja inerti ominaisuuksiin. Lisäksi kaikki harvesteripään ja pituusmittalaitteen mekaaniset jäsenet mallinnetaan jäykkinä.

Muiden toimilaitteiden kohdalla ei mallinneta hydraulikkaa. Näitä toimilaitteita ohjataan mahdollisesti ennalta tunnetuilla funktioilla tai hyödyntämällä aiemmista mittauksista saatua dataa. Työkierron aikana harvesteripään ja puun välillä on useita kontaktipisteitä näiden mallinnuksessa joudutaan tekemään yksinkertaistuksia. Esimerkiksi puun ja syöttörullien välisissä kontakteissa ei huomioida todellisuudessa tapahtuvaa lipsumista, joka taholtaan yksinkertaistaa luotavaa mallia.

2 TUOTEKEHITYSPROSESSIN KUVAUS

Tuotesuunnittelulla ja -kehityksellä tarkoitetaan markkinoiden tarjoaman mahdollisuuden hyödyntämistä ja tämän mahdollisuuden tuotteistamista, tuotteen myyntiä sekä jakelua. Markkinoiden tarjoamien mahdollisuuksien lisäksi on muita tekijöitä, jotka voivat mahdollistaa tuotekehitysprosessin käynnistämisen. Näitä tekijöitä voivat olla esimerkiksi uuden teknologian tuomat mahdollisuudet ja mahdollisen toimintaympäristön tuomat muutokset. Tuotekehityksen tarkoituksena on taloudellinen menestyminen ja näin ollen tuote on valmistettava mahdollisimman vähäisillä kustannuksilla. [2, s. 2]

Tuotesuunnittelu ja -kehitys ovat riippuvaisia myös yrityksen muista osa-alueista. Markkinoinnin alueelta saadaan arvokasta informaatiota koskien tuotteita tai mahdollinen signaali uuden tuotteen tarpeesta. Lisäksi markkinointi hoitaa tuotteen lanseerauksen. Suunnittelu ja tuotekehitys vastaa tuotteen konkretisoitumisesta, missä tuote vastaa parhaansa mukaan asiakkaiden tarpeita. Valmistus hoitaa tuotteen osien valmistuksen ja tuotteen kokoonpanon. Tämä osa-alue hoitaa myös mahdollisten osto-osien hankinnan, asennuksen ja tuotteen perille toimituksen. Kuvassa 2 on esitetty tuotesuunnittelun ja -kehityksen sijoittuminen organisaatiossa. [2, s. 3-4]



Kuva 2. Tuotekehityksen sijoittuminen yleisesti organisaatiossa. [3, s. 7, muokattu]

Informaation kulun rooli organisaation sisällä on merkittävä, mikä voidaan huomata kuvasta 2. Informaation kulkua on havainnollistettu ohuella katkoviivalla ja tuotteen kulkua nuolella. Informaation määrä voi olla hyvinkin suuri isossa organisaatiossa ja sen ylläpitäminen vaatii resursseja. Lisäksi kuvasta 2 voidaan huomata kuinka

keskeisellä paikalla tuotesuunnittelu ja -kehitys organisaatiossa ovat. Tämä korostaa vuorovaikutuksen merkitystä muiden osastojen kesken ja yhdistää nämä toimivaksi kokonaisuudeksi. Eri osastojen asiantuntijoiden yhteistyö edesauttaa suunnittelun ja tuotekehityksen työntekijöitä ymmärtämään asioita, jotka tulisi ottaa huomioon suunnittelussa. Valmistus ja tuotanto ovat tällaisia osastoja. [3, s. 6]

Menestyksekkään tuotekehityksen pääpiirteinä voidaan pitää tuotteen hyvää laatua ja alhaisia valmistuskustannuksia. Lisäksi nopealla tuotekehityksen läpivientiajalla, alhaisilla tuotekehityskustannuksilla sekä kyvykkyydellä kehittää uusia tuotteita tehokkaasti on positiivinen vaikutus tuotekehityksen menestymiseen. Mikäli kyseiset tavoitteet täyttyvät niin tuotekehitysprosessia voidaan pitää taloudellisesti menestyvänä. Muitakin kriteerejä on, jotka ovat yhtä tärkeitä. Nämä kriteerit saattavat tulla jäseniltä, jotka ovat tekemisissä organisaation kanssa. Esimerkkeinä näistä jäsenistä voidaan mainita osakkeenomistajat ja tuotekehitystiimin jäsenet. [2, s. 2-3]

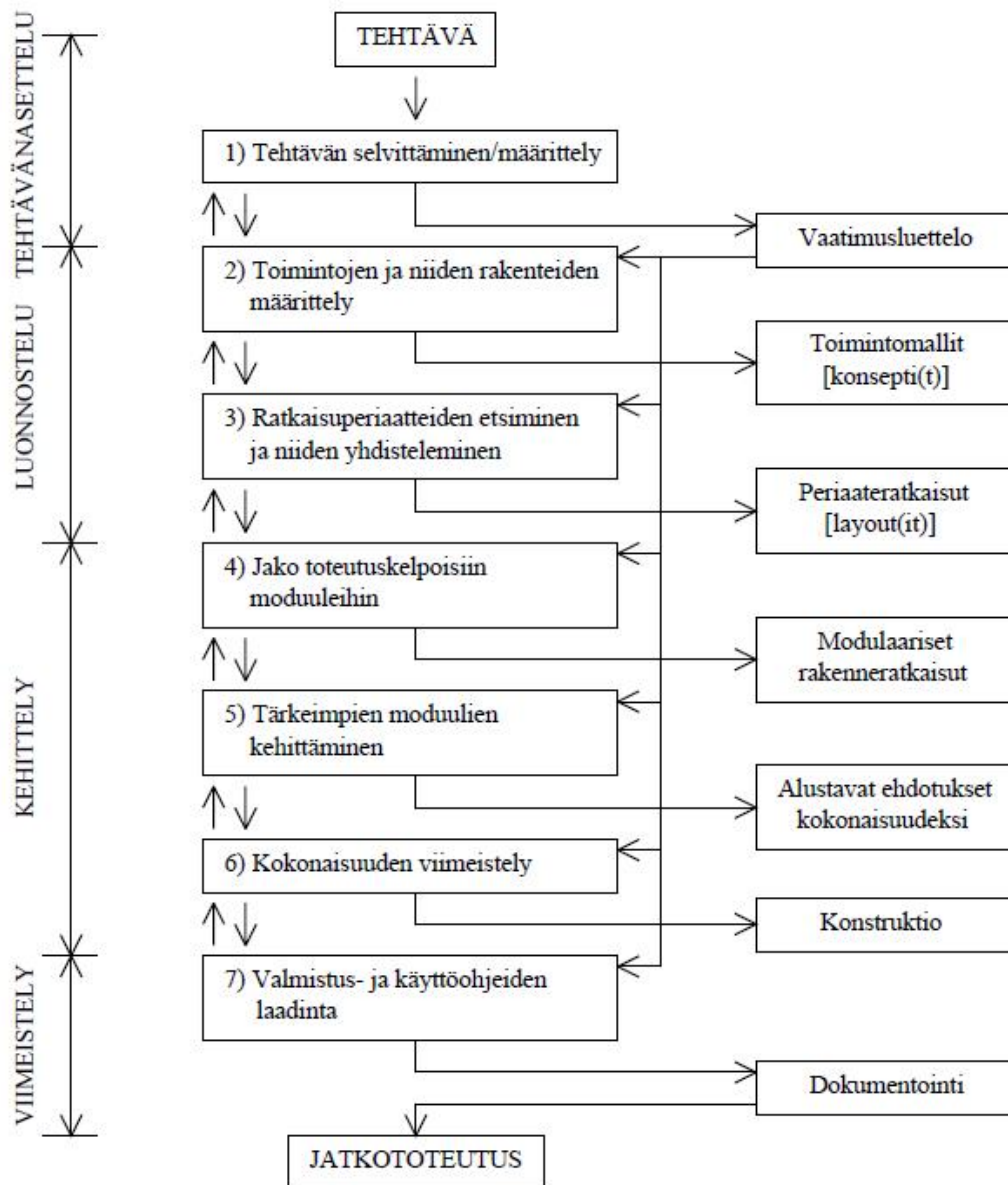
Tuotteen teknisten ja ekonomisten ominaisuuksien toteutuminen on pääasiallisesti suunnittelijoiden vastuulla. Näin ollen on syntynyt tarve luoda systemaattinen prosessi hyvien ratkaisujen löytämiseksi sekä myös mahdollisen toistettavuuden takia. Prosessi vaatii suunnittelijoilta tietoutta prosessista sekä systemaattista tapaa työskennellä. Systemaattisen prosessin tarkoituksena on myös tukea kekseliäisyyttä ja kartuttaa kokemusta, joita suunnittelijat voivat hyödyntää myöhemmissä projekteissa. [3, s. 9]

2.1 Järjestelmällinen tuotekehitys

Tuotekehitysprosessille on luonteenomaista askelmaisuus. Kunkin askeleen jälkeen on toivottavaa, että tuotteen kehitysprosessi on lähempänä lopullista tuotetta. Näin ollen uusimman askeleen on oltava aina edellistä tarkempi. Askelille on hyvin tyypillisiä iteraatioita, joilla tarkoitetaan kyseisen askeleen toistamista. Yleensä iteraatioon johtaa tyytymättömyys askeleen tulokseen. Iteraatioita ovat suotavia parhaan mahdollisen tuloksen saavuttamiseksi. Iteraatiokierrosten minimoimiseksi ja suunnitteluprosessin tehostamiseksi voidaan hyödyntää suunnitteluprosessissa järjestelmällistä lähestymistapaa. [3, s.125-126]

Järjestelmällistä lähestymistapaa noudattava tuotekehitysprosessi voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, mutta tarkkojen rajojen asettaminen näiden vaiheiden välille ei aina ole

mahdollista. Prosessin ymmärtäminen tuotekehitystiimin jäsenien keskuudessa sekä yhteistyön määrä edesauttaa näiden vaiheiden tunnistamista, mikä tuo myös joustavuutta ja tehokkuutta tuotekehitysprosessiin kokonaisuutta tarkastellessa. Kuvassa 3 on esitetty järjestelmällinen tuotekehitysprosessi VDI 2221, josta nämä eri vaiheet voidaan havaita. [3, s. 128-129]



Kuva 3. VDI 2221 mukainen tuotekehitysprosessin kulku. [3, s.130, muokattu]

Edellä esitetyn kuvan perusteella tuotekehitysprosessi jakaantuu järjestyksessään: tehtävänasetteluun, luonnosteluun, kehittelyyn ja viimeistelyyn. Kuten kuvasta 3 huomataan, vaihe voi sisältää erinäisiä määriä tehtäviä. Kunkin kyseisen vaiheen

läpivienti vaatii näiden tehtävien suorittamista ennen kuin seuraavaan vaiheeseen voidaan siirtyä. [3, s.129]

2.1.1 Tehtävänasettelu ja luonnostelu

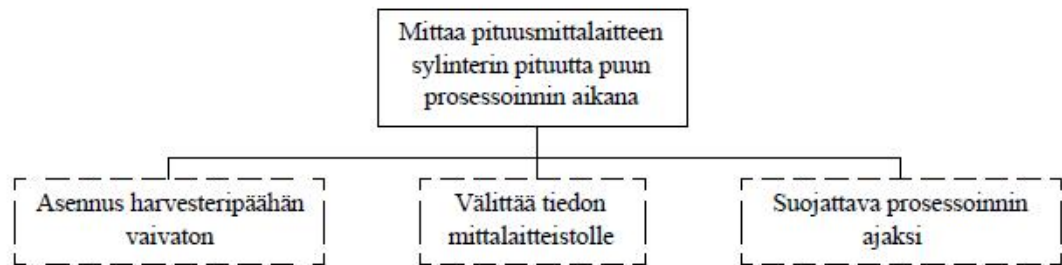
Lopullisella tuotteella on tietyt odotukset, jotka sen tulee täyttää. Nämä odotukset pyritään määrittämään mahdollisimman tarkasti tuotekehitysprosessin ensimmäisessä vaiheessa. Myös olemassa olevat rajoitukset ja niiden merkitykset tulee tiedostaa muodostettaessa kokonaiskuvaa tehtävänasettelusta. Odotuksilla tarkoitetaan tuotteelta haluttuja ja/tai vaadittuja ominaisuuksia, joita esimerkiksi asiakkaat voivat esittää tämän vaiheen yhteydessä. Resurssien vajavaisuutta tietyllä osa-alueella voidaan pitää rajoitteena. Esimerkiksi, jos kyseistä tuotetta tai osaa ei välttämättä ole mahdollista sen hetkellä teknologialla toteuttaa. [3, s. 131]

Ensimmäinen vaihe tuotekehitysprosessissa ei ole ainoastaan tuotteen ominaisuuksien määrittelyä. Tässä vaiheessa tulee myös laatia tuotekehitysprosessin aikataulu sekä määrittellä alustava kustannusrakenne. Nämä yhdessä sanelevat kuinka pitkälle lopullinen tuote viedään jatkokehittämissä ajan ja rahan puitteissa. Suunnittelun ja tehtävänasettelun dokumentoituna tuloksena on vaatimuslista, joka käynnistää tuotekehitysprosessin seuraavan vaiheen. Vaatimuslistaa voidaan kuvata eräänlaisena ohjenuorana järjestelmällisessä tuotekehitysprosessissa. Kyseinen dokumentti toimii myös mittarina. Luodun vaatimuslistan pohjalta voidaan mahdollisesti arvioida tuotekehitysprojektin onnistuneisuutta. [3, s. 145]

Vaatimuslistan pohjalta käynnistyy prosessin toinen vaihe eli luonnostelu. Vaiheelle on tyypillistä, että pohditaan alustavia materiaalivalintoja, rakenteiden muotoja sekä valmistusmenetelmien solvetuvuuksia. Näin vaatimuslista konkretisoituu. Tämän vaiheen tarkoituksena on määrittellä tuotteen periaatteellinen ratkaisu. Abstrahointi, toimintorakenne sekä toimintoperiaatteet ja näiden yhdistäminen rakenteeksi ovat tämän vaiheen keskeisimpiä tehtäviä. [3, s.131]

Abstrahoinnin tarkoituksena on pelkistää vaatimuslistan sisältö selkeäksi kuvaukseksi ongelmasta [3, s.161]. Huolellisesti toteutetun abstrahoinnin pohjalta luotu kuvaus selkeyttää seuraavia vaiheita merkittävästi, muun muassa rajoitteita ja toimintoja [3, s.161]. Luodun kuvauksen pohjalta voidaan luoda tulevasta tuotteesta toimintorakenne. Tällä rakenteella tarkoitetaan toimintoja, jotka toteuttavat abstrahoinnista saadun

kuvauksen. Toimintorakenteesta voidaan lisäksi erottaa päätöiminnot ja näitä tukevat alitoiminnot. Kuvassa 4 on esitetty toimintorakenteen periaate. Ongelman kompleksisuudella on tapana kasvattaa toimintojen lukumäärää toimintorakenteessa. Näissä tilanteissa on turvauduttava alitoimintoihin, jotta rakenteen kompleksisuustaso laskisi. [3, s.169-171]



Kuva 4. Toimintorakenne pituusmittalaitteen sylinterin instrumentoinnille.

Toimintorakenteen pohjalta laaditaan toimintoperiaateluonnoksia kullekin toiminnolle. Näistä ratkaisuista muodostetaan lopullinen tuote. Kunkin ratkaisun on toteutettava toiminnolta vaadittavat edellytykset. Kuvassa 4 on esitetty eräs tapa määrittää toimintoperiaatteita. Tässä vaiheessa vaihtoehtoja toiminnon toteuttamiseksi voi kehkeytyä monia ja se on suotavaa parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Jatkokehitykseen valittava(t) ratkaisu(t) saadaan aikaan yhdistelemällä parhaat toiminnot, jotka voidaan myös havaita taulukosta 1. Toimintojen yhdistäminen fyysiseksi kokonaisuudeksi on haaste johtuen toimintojen fyysisistä ja geometrisista erilaisuuksista. [3, s.181-185]

Taulukko 1. Ideamatriisi kuvan 4 toimintorakenteen pohjalta.

Vaihtoehdot Toiminnot	I	II	III
Asennus harvesteri- päähän vaivaton	Asennus sylinterin kylkeen	Asennus alkuperäsiin osiin liittäen	Modifioidut osat alkuperäisen osien paikalle
Välittää tiedon mittalaitteistolle	Jännite (tieto CAN- väylällä)	Pulssi (tieto CAN- väylällä)	
Suojattava prosessoinnin ajaksi	Rungon suojassa	Suojakotelo	

Luonnosteluvaiheen pohjalta löytyneet kokonaisuudet harvoin päätyvät sellaisenaan lopullisiksi tuotteiksi, koska ne ovat vain periaatteita. Kokonaisuuksia on arvioitava keskenään kriittisesti, jotta paras mahdollinen tai parhaat mahdolliset kokonaisuudet päätyisivät jatkokehitykseen. Toimintoja arvioitaessa ja luotaessa kokonaisuuksia voidaan suorittaa karkeita laskelmia, jotka pohjautuvat tehtyihin oletuksiin. Myös toimintojen yhdistäminen hyödyntämällä visualisointia edesauttaa suoritettavaa arviointia. [3, s.190-191]

2.1.2 Jatkokehittely ja viimeistely

Kolmantena vaiheena järjestelmällisessä tuotekehitysprosessissa on jatkokehittely, kuten kuvasta 3 huomataan. Kyseistä vaihetta voidaan pitää prosessin vaativimpana ja kompleksisimpana vaiheena. Syinä tälle voidaan pitää monien eri tehtävien yhtäaikainen suorittaminen sekä informaation määrästä johtuvien iteraatioiden suorittaminen. Lisäksi jatkokehittelyssä on huomioitava teknologiset ja ekonomiset seikat, kuten valmistusmenetelmät ja konstruktion valmistuskustannukset. Tämän vaiheen lopputuloksena on lopullinen konstruktio, jolle on suoritettu tarvittavat laskelmat, materiaalivalinnat ja rakennemuotoilut. [3, s.227-228]

Lopullisen konstruktion löytymistä edeltävät tyypillisesti luonnosteluvaiheesta muodostetut jatkojalostetut konstruktio eli alustavat konstruktio. Näitä konstruktioita kehitetään ja mahdollisesti konstruktion sisältämien toimintojen järjestystä muunnellaan suotuisammiksi. Suurin osa tämän vaiheen kehitystyöstä tapahtuu muodostettaessa alustavia konstruktioita, sillä niitä voi olla useampi niin sanotusti työn alla. Lisäksi työmäärää nostaa jatkuva arviointi toimintojen soveltuvuudesta. Tässä vaiheessa voidaan vielä asettaa jokin toiminto toissijaiseksi, mikäli merkitys lopputulokseen ei ole merkittävä. [3, s.228-231]

Lopulliseksi konstruktioiksi päätyvälle alustavalle konstruktioille suoritetaan optimointia, jotta konstruktion lopullinen muoto ja funktiot vastaisivat odotuksia. Tyypillisesti tässä vaiheessa tarkastetaan laskelmat ja pyritään eliminoimaan virheitä ja häiriötekijöitä, mikäli niitä vielä tässä vaiheessa löytyy. Lisäksi valmistuskustannuksien läpikäyminen ja minimoiminen ovat olennainen osa tätä vaihetta, kuten alustavien osaluetteloiden ja valmistuspiirrosten luominen. [3, s. 229-231]

Järjestelmällisen tuotekehitysprosessin viimeinen vaihe on viimeistely, joka päättää

prosessin. Tässä vaiheessa konstruktion yksityiskohdat hioutuvat ja jokainen osa dokumentoidaan. Dokumentit sisältävät yksityiskohtaiset tiedot kuinka osa valmistetaan, mistä materiaalista valmistetaan sekä mitkä ovat osan dimensiot ja toleranssit. Lisäksi on laadittava kokoonpanopiirustukset ja osaluettelot konstruktiosta tuotantoa varten. [3, s.436-438]

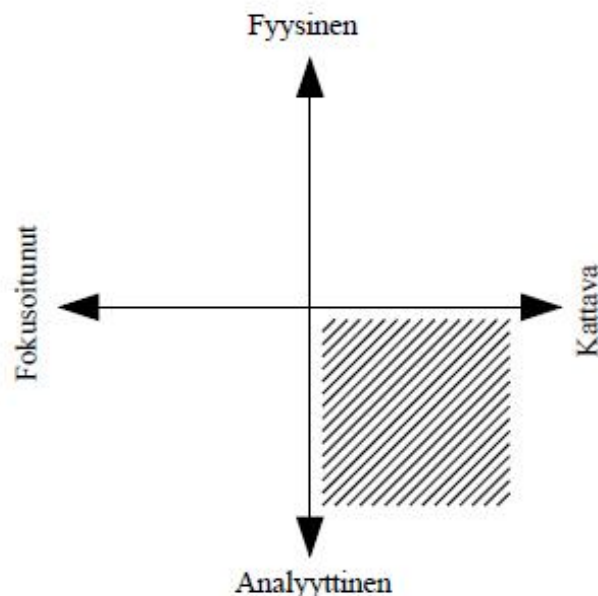
CAD-ohjelmistolla luotuja osia (dokumentteja) voidaan hyödyntää valmistuksen saralla. Tiedoston kääntö toiseen formaattiin on hyvin todennäköistä johtuen eri ohjelmistojen käytöstä valmistuksessa. Tämä nopeuttaa osien valmistusta, mutta alttius virheelle on olemassa. Esimerkkinä voidaan mainita virhe levyosien skaalauksessa muodostettaessa formaattia levyosien nestaukseen. Jatkokehittelyn ja viimeistelyn erottava raja on hyvin häilyvä ja on tyypillistä, että nämä vaiheet ovat yhtä joillain tekniikan osa-aloilla. [3, s.436-438]

2.1.3 Prototyyppi ja esisarjat

Prototyyppiä voidaan kuvata prosessina, jossa valmistetaan tuotekehitysprojektissa suunnitellun tuotteen approksimaatio. Tuotekehitysprosessissa viimeistelyä tuotetta voidaan tutkia prototyyppien avulla ennen tuotteen lanseeraamista. Prototyypit voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan, mitä tuotekehitysprojektilta halutaan. Oppiminen, kommunikointi, sulauttaminen ja eräänlaisena virstanpylväänä toimiminen ovat näitä prototyyppien käyttötarkoituksia. Lisäksi prototyypit jaetaan kahteen dimensioon. Ensimmäinen dimensio käsittää tuotteesta tehtävän prototyypin fyysisuusasteen ja toinen dimensio toimintoasteen. [2, s. 247-251]

Mietittäessä tuotteen toimintaa ja kuinka tuote vastaa asiakkaan tarpeita, voidaan prototyyppiä hyödyntää oppimisen työkaluina. Prototyypin valmistaminen toimii myös kommunikaatiovälineenä tuotekehitysprojektin eri jäsenten välillä. Näihin jäseniin lukeutuvat mm. projektin johto, sijoittajat, suunnittelijat ja asiakkaat. Tuote voi olla hyvin kompleksinen ja sisältää erilaisia toimintoja ja osajärjestelmiä. Näiden sulauttamista yhdeksi tuotteeksi ja toiminnan testaamista voidaan tutkia prototyyppien avulla. Prototyypit toimivat myös toimia eräänlaisina virstanpylväinä tuotekehitysprojekteissa. Kehitystyön ollessa riittävällä tasolla voidaan luoda prototyyppi, jonka jälkeen projekti mahdollisesti voi edetä seuraavaan vaiheeseen. [2, s. 249-251]

Prototyyppien luokittelusta kahteen dimensioon voidaan luoda kuvaus kuinka prototyyppi sijoittuu näiden kahden dimension mukaan. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki tästä kuvauksesta. Prototyypin ensimmäinen dimensio eli fyysisyysaste on esitetty kuvassa 5 pystyakselilla. Prototyypin fyysisyysasteen ääripäät ovat analyyttinen ja fyysinen. Fyysisellä prototyypillä tarkoitetaan kouriintuntuvaa mallia tuotteesta tai tämän osasta. Analyyttisellä prototyypillä voidaan tarkoittaa esimerkiksi matemaattista mallia. Toinen dimensio on esitetty kuvassa 6 vaaka-akselilla. Prototyypin toimintoaste vaihtelee fokusoituneen ja kattavan prototyypin väliltä. Tutkittaessa tuotteen tiettyä toiminnon osa-aluetta ja tästä muodostettua prototyyppiä puhutaan fokusoituneesta prototyypistä. Vastakohtana tälle on kattava prototyyppi, jossa toteutetaan tuotteen jokainen toiminto eli tuotteen täydellinen versio. [2, s.247]



Kuva 5. Prototyyppien luokittelu kahteen dimensioon. [2, s. 249, muokattu]

Tarkastelemalla kuvaa 5 prototyyppien dimensioihin jaottelusta ja pohdiskelemalla prototyyppien käyttötarkoitusten jaottelua voidaan huomata kuinka nämä kohtaavat toisensa. Prototyypin ollessa analyyttinen ja fokusoitunut tiettyyn osaan tuotetta voidaan todeta, että kyseisen prototyypin käyttötarkoitus on lähinnä oppimisessa. Tällaisesta tapauksesta voidaan mainita esimerkiksi säätäjän rakentaminen ja virittäminen simulointiohjelmiston avulla. Fyysisen ja fokusoituneen prototyypin käyttötarkoituksena voidaan pitää oppimisen lisäksi myös kommunikointia. Fyysisen mallin avulla voidaan kommunikoida eri tahojen välillä tuotteen osan ympärillä

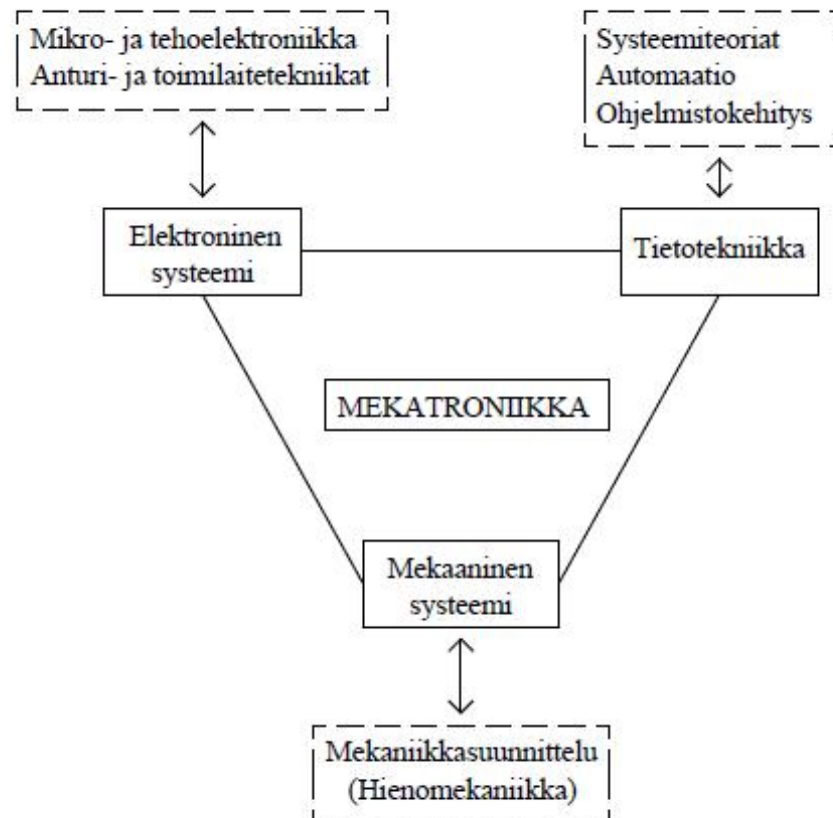
vallitsevista asiasta. Ilman tällaista mallia virhe väärinymmärtämiselle mahdollisesti kasvaa. Fyysisesti kattava prototyyppi sisältää eri osa-alueiden sulautumisen keskenään toisiinsa ja samalla prototyyppi toimii eräänlaisena virstanpylväänä tuotekehitysprojektille. Tällöin voidaan todeta, että kyseinen prototyyppi sisältää kaikki käyttötarkoitukset. [2, s. 247 & s. 249-251]

Tarkasteltaessa analyttisen ja fyysisen prototyypin ominaisuuksia voidaan todeta, että nämä tukevat toisiaan ja täydentävät toisiaan. Analyttinen prototyyppi voi olla esimerkiksi matemaattinen kuvaus, jossa eri parametrien vaikutusta johonkin prototyypin osaan voidaan tutkia paljon helpommin kuin fyysisessä prototyypissä. Näin myös saadaan enemmän ratkaisuvaihtoehtoja, joista voidaan paras mahdollinen löytää. Fyysisiä prototyyppijä taas käytetään sellaisten ilmiöiden havainnointiin, jotka eivät analyttisissä prototyypeissä ilmene. Syynä voidaan tyypillisesti pitää matemaattista kuvausta. Lisäksi fyysinen prototyypin luonnissa voidaan havaita tekijöitä tai ilmiöitä, jotka eivät ole ilmenneet suunnittelussa. Toisaalta fyysisten prototyyppien luomisessa täytyy huomioida kustannukset eli kuinka kattava tai kuinka moneen fokusoituneeseen prototyyppiin on varaa. [2, s. 252]

Ensimmäisistä prototyypeistä voidaan havaita seikkoja, jotka vaativat muutosehdotuksia lopulliseen tuotteeseen. Näiden muutosten jälkeen valmistetaan tuotteesta sarja, joka sisältää ensimmäiset lopulliset versiot tuotteesta. Näitä tuotteita voidaan vielä pitää prototyypeinä. Tätä kyseistä sarjaa voidaan kutsua esisarjaksi. Tuotteen kompleksisuus ja kustannukset vaikuttavat esisarjan kokoon. Esisarjan teettämisellä on omat tarkoituksensa. Tuotantoprosessin kapasiteetin verifiointi on eräs näistä tarkoituksista. Tämän yhteydessä tarkkaillaan myös mahdollisesti tuotannon muunneltavuutta kyseiselle tuotteelle sopivaksi, jotta tuote saataisiin valmistettua mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi esisarjan tuotteille suoritetaan mahdollisesti lisätestejä. Esisarjan tuotteita voidaan myös luovuttaa tai jopa myydä asiakkaalle, jolta voi tulla vielä mahdollisia parannusehdotuksia. [2, s. 260]

2.2 Mekatroninen lähestymistapa tuotekehityksessä

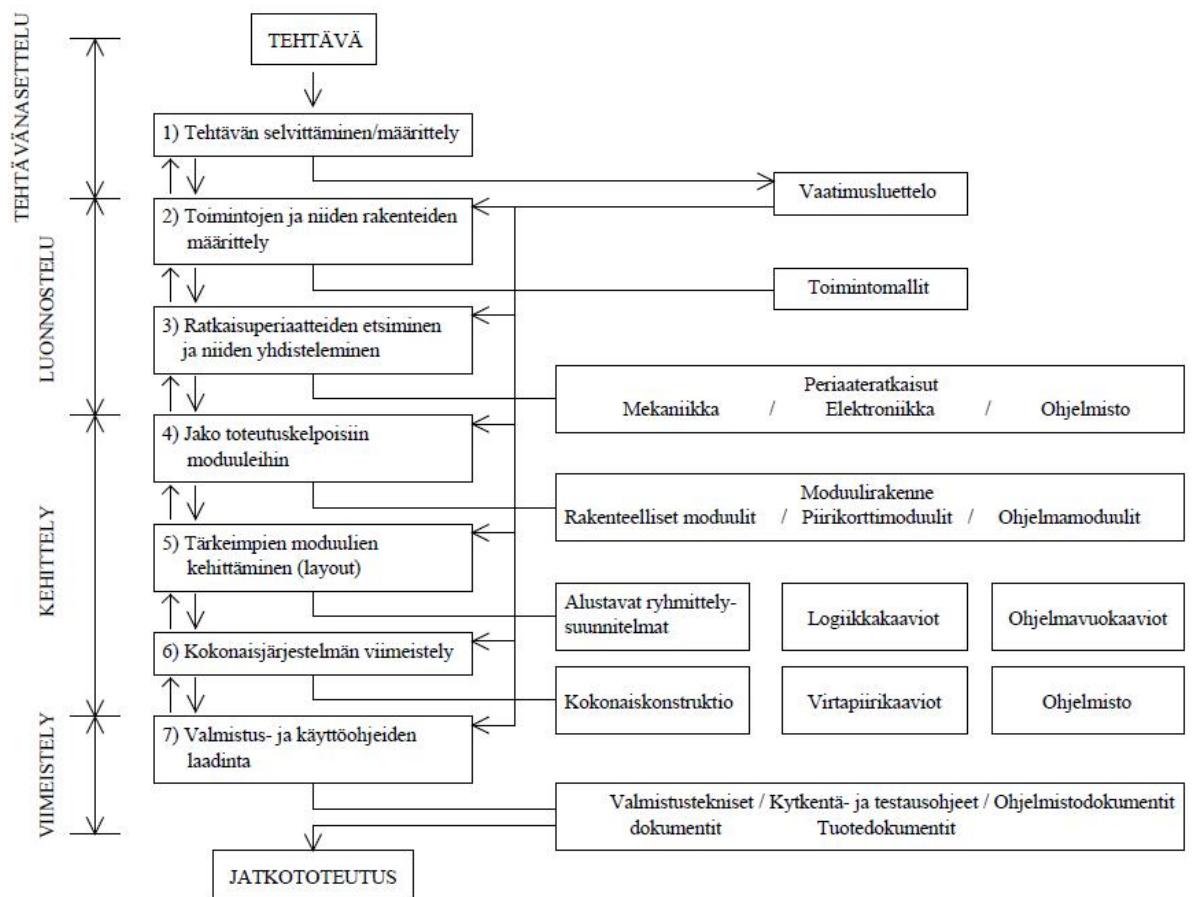
Mekatronisen tuotteen kehittäminen on hyvin moniteknistä ja haasteellista. Kehitystyö vaatii monen eri tieteenalan hallitsemista tuotekehitystiimiltä. Näihin tieteenaloihin kuuluvat konetekniikan lisäksi tieto- ja sähkötekniikka. Kuvassa 6 on esitetty mekatronisen tuotteen jakautuminen eri tieteenaloille. Tosin rajat näiden alojen välillä saattavat olla häilyviä ja tarkka jaottelu on tyypillisesti vaikeaa. Jo eri alojen yhdistämisen takia tuotekehitysprosessi vaatii systemaattisen lähestymistavan kehitystyössä, sillä usean alan ammattilaisten työskentely vaatii prosessilta joustavuutta ja yhteisymmärrystä. [3, s. 448-450]



Kuva 6. Mekatronisen tuotteen jaottelu tieteenaloille. [3, s. 449, muokattu]

Mekatronisen laitteen tuotekehitysprosessissa voidaan hyödyntää aiemmin kuvattua yleistä tuotekehitysprosessia. Kuvassa 7 on esitetty tuotekehitysprosessi mekatroniselle tuotteelle VDI 2221 mukaillen. Alla esitetty tuotekehitysprosessi kohdistaa suuret vaatimukset ja odotukset mekatronisen tuotteen projektinhallintaan, käytössä oleviin

työkaluihin, kehitystiimin kommunikaatioon ja tehtävänasetteluun. Tämä edellyttää kehitystiimin jäseniltä monitaitoisuutta eri tieteenaloilta, jotta kehitysprosessi olisi mutkaton. Täytyy kumminkin muistaa, että tuotekehitysprosessin eteneminen tehtävänasettelusta viimeistelyyn ei ole suoraviivainen. Tehtyjä päätöksiä tulee tarkastella kriittisesti ja prosessin aikana joudutaan todennäköisesti tekemään muutoksia. Muutoksien perusteena on tyypillisesti uusi informaatio. Näin ollen tuotekehitysprosessia voidaan kuvata luonteeltaan iteratiiviseksi. [4, luku 1 s. 13-15]



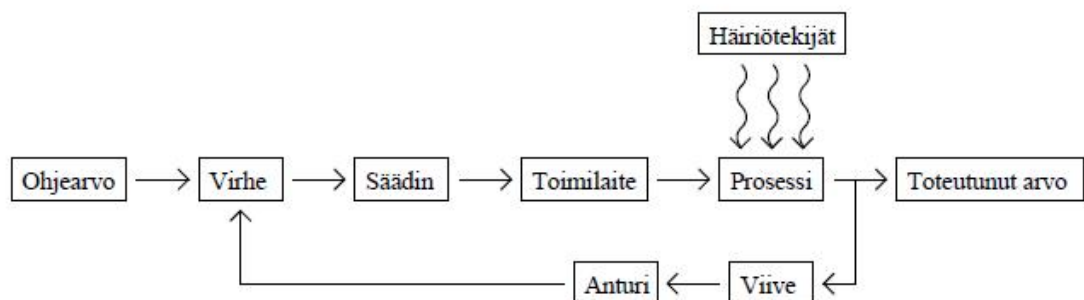
Kuva 7. Tuotekehitysprosessi mekatroniselle tuotteelle (VDI 2221). [4, luku 1 s. 14]

Jokaisen tuotekehitysprosessin vaiheen jälkeen on nähtävissä jokaiselle vaiheelle ominaiset dokumentit. Kuten kuvasta 7 nähdään, tehtävänasettelun jälkeisenä dokumenttina on vaatimuslista tuotteelle. Mekatronisen tuotteen kohdalla näiden dokumenttien määrä on suurempi kuin perinteisen koneensuunnittelun kohdalla johtuen tuotteen moniteknisyydestä. Kuvassa 7 esitetyn kaavion pohjalta voidaan näiden muiden dokumenttien joukkoon luetella esimerkiksi logiikkakaaviot ja ohjelmavuokaaviot. [4, luku 1 s. 13-15]

2.2.1 Automaatio ja ohjaus

Automaation merkitys koneissa ja laitteissa on kasvanut merkittävästi viime vuosikymmenien aikana. Tyypillinen syy automaation lisäämiseksi on tyytymättömyys konstruktion hyötysuhteeseen. Automaation kehitys on mahdollistanut monien tuotteiden kehittymisen ja on vakiinnuttanut asemansa osana koneiden ja laitteiden suunnittelua. Automaation perimmäinen tarkoitus on ohjata ja tarkkailla konstruktion toimintoja itsenäisesti, mutta tähän vaikuttaa merkittävästi konstruktion automaation aste. [5, s. 5 & s. 14]

Konstruktion prosesseja täytyy ohjata ja tämä vaatii tyypillisesti ohjausjärjestelmän laatimisen kullekin prosessille, jotka toimilaitteet toteuttavat. Perimmäinen tarkoitus ohjauksella on ylläpitää toimilaitteelle välittyvä lähtösuure annetun ohjearvon (tulosuureen) mukaisena. Kuvassa 8 on havainnollistettu perinteinen ohjausjärjestelmän malli. [6, luku 6 s. 15]



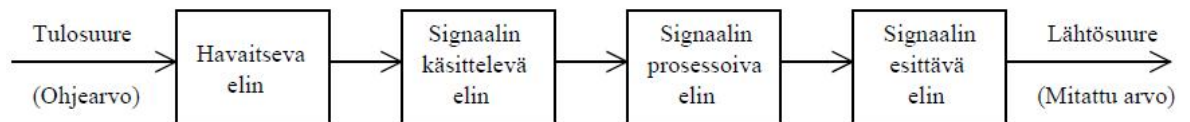
Kuva 8. Ohjausjärjestelmän perinteinen malli. [6, luku 6 s. 15, muokattu]

Kuvassa 8 esitetyistä ohjausjärjestelmästä voidaan havaita tärkeimmät komponentit, joista ohjausjärjestelmä koostuu. Nämä ovat säädin ja anturi. Lisäksi voidaan havaita tekijät, jotka vaikuttavat ohjausjärjestelmän toimintaan. Näitä ovat toimilaitteet, prosessi ja prosessiin vaikuttavat ulkoiset häiriötekijät sekä viive. Anturin tehtävä on välittää tietoa prosessin tilasta säätimelle, joka vertaa mitattua arvoa haluttuun arvoon ja sen perusteella säätää lähtösuuretta toimilaitteelle. Ohjausjärjestelmille voidaan tehdä tyypillisesti karkea jako tyypin mukaan. Ohjausjärjestelmät jaetaan avoimiin ja takaisinkytkettyihin ohjausjärjestelmiin. Sopivan ohjausjärjestelmän valinta on riippuvainen prosessista, johon ohjausjärjestelmää suunnitellaan. [6, luku 6 s. 15-16]

Idealisessa tapauksessa mekatronisen konstruktion ohjausjärjestelmää suunniteltaessa, ja tätä optimoidessa, tulisi huomioida prosessi, säädin, anturit ja toimilaitteet, jotta optimoidessa kokonaisuutta löytyisi paras mahdollinen lopputulos. Tyypillisesti joudutaan pilkkomaan ohjausjärjestelmän optimointi osiin ja näin ollen yhtäaikainen optimointi ei toteudu. Ohjausjärjestelmän eri osien eriaikainen kehittäminen ja optimointi vaatii lopulta yhdistämisen ja lopputarkastelun toimivuudesta. Mahdollisesti joudutaan vielä suorittamaan lisäviritystä yhdistämisen jälkeen. [7, luku 21 kpl. 21.1]

2.2.2 Mekatronisen prosessin mittaus

Mekatronissa laitteissa liikkeet suoritetaan tyypillisesti hydraulisesti, pneumaattisesti tai sähköisesti. Laitteen prosessien tuottamaa informaatiota on tarkasteltava ja tämä vaatii laitteen käyttäjän ja prosessin välille mittausjärjestelmän [8, s. 3-4]. Prosessin tuottamaa informaatiota voivat olla esimerkiksi hydraulisen järjestelmän painetasot tai liikutettavan jäsenen asema/kiertymä [8, s. 3-4]. Kuvassa 9 on havainnollistettu mittausjärjestelmän rakennetta.



Kuva 9. Mittausjärjestelmän perusrakenne. [8, s. 4, muokattu]

Mittausjärjestelmän perusrakenne voidaan kuvan 9 perusteella jakaa neljään eri elimeen. Järjestelmän rakenne voi varioida ja tähän vaikuttaa merkittävästi mitattavan informaation luonne, eli millainen on prosessi, jota tutkitaan. Rakenteen ensimmäinen elin on mitattavan suureen havaitseva elin eli anturi, joka on suorassa yhteydessä prosessiin. Kyseinen elin välittää raakaa informaation mittausjärjestelmän seuraavalle elimelle. Seuraavana elimenä on anturin tuottaman signaalin käsitlevä elin. Anturin välittämää informaatiota joudutaan muuntamaan tyypillisesti muotoon jota on mahdollista myöhemmin prosessoida. Kolmantena elimenä on signaalin prosessoiva elin, jonka avulla voidaan käsiteltyä signaalia muokata esitettävämpään muotoon. Tällaisia signaalin prosessoiteja ovat esimerkiksi kohinan suodattaminen. Viimeisenä elimenä on signaalin esittävä elin, jonka tarkoituksena on havainnollistaa anturin havaitsema signaali käyttäjälle. [8, s. 4-5]

Mekatronisissa laitteissa hyödynnettäviä mittaajärjestelmiä voidaan hyödyntää myös muualla. Tyypillisesti näitä hyödynnetään itsenäisinä laitteistoina laboratorio- tai kenttäolosuhteissa. Mittausjärjestelmän kannalta on huomioitava laitteiston ominaisuudet ja rajoitteet, kun suoritetaan mittauksia tai suunnitellaan mekatronisen laitteen mittaajärjestelmää. Mekatronisen laitteen käyttöympäristö tai tutkittavana oleva mittauskohde vaikuttavat mittaajärjestelmän elimien valintoihin ja kokoonpanoon, jotta paras mahdollinen lopputulos saavutettaisiin. [9, s. 4-5]

2.3 Kontaktien mallinnus mekaanisissa järjestelmissä

Teknisiä laitteita suunniteltaessa ja kehiteltäessä sekä luonnonilmiöitä tarkasteltaessa voidaan havaita tilanteita, joissa tapahtuu kosketus. Näitä kutsutaan kontakteiksi. Jalan kosketus maahan kävellessä, polkupyörän renkaan kosketus tien pintaan pyöräillessä tai lumivyöry ovat hyviä esimerkkejä monista tilanteista, joissa tapahtuu kontakti. Teknisistä sovellutuksista esimerkkeinä mainittakoon vaihteistojen hammaspyörästöt ja auton kytkin. Käsitteeseen kontakti liittyy läheisesti kitka, sillä ilman kitkaa edellä mainittuja liikkeitä ei olisi mahdollista suorittaa. [10, s. XV]

Kontaktimekaniikkaa ympäröi ominaisuus, joka on epälineaarisuus. Tutkittavaa ongelmaa ratkaistessa analyttisesti joudutaan kyseisen ominaisuuden takia tekemään yksinkertaistuksia, vaikka ratkaistava ongelma olisikin hyvin yksinkertainen. Nykyään ratkaisuissa voidaan hyödyntää numeerisia menetelmiä kehittyneen tietotekniikan ansiosta. Lisäksi numeeristen menetelmien yleistyneeseen käyttöön on vaikuttanut kontaktissa olevien komponenttien geometrioiden kompleksisuus ja suurten deformaatioiden syntyminen kontaktitilanteessa. Tapaukset, joissa numeerisia menetelmiä ei hyödynnetä ovat erikoistapauksia. [10, s. XV-XVII]

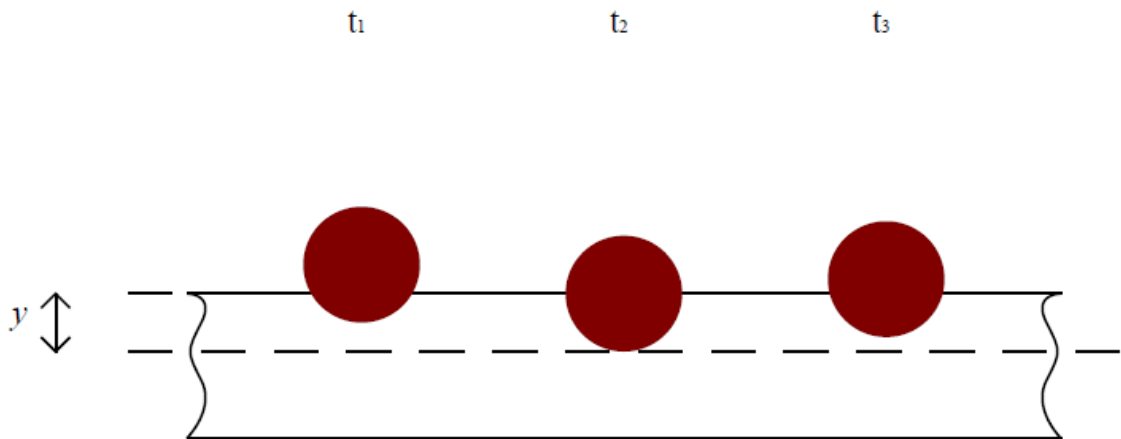
Kontakteja ilmenee monilla eri tieteenaloilla, joten jaottelua on täytynyt tehdä johtuen tutkittavan kontaktin luonteesta. Elementtimenetelmän (FEM) avulla tutkitaan kontaktin aiheuttamia deformaatioita ja näistä syntyviä jännityksiä materiaaliin elastisella sekä plastisella alueella. Diskreetin elementtimenetelmän (DEM) avulla perehdytään ongelmiin, joissa kontaktissa on useita kappaleita. Tällaisessa tilanteessa kappaleiden lukumäärä voi olla jopa 10^8 . Monikappaledynamiikassa (MBD/MBS) tarkastellaan mekaanisen järjestelmän dynaamista käytöstä. Mekaanisessa järjestelmässä voi olla kappaleita, jotka ovat kontaktissa ja näitä voidaan tutkia monikappaledynamiikan

avulla. [10, s. XVII]

Numeerisia ratkaisumenetelmiä kontaktin mallinukseen on hyvin paljon ja jokaisella menetelmällä on omat etunsa ja heikkoutensa. Seuraavissa kappaleissa käsitellään muutamia monikappaledynamiikassa hyödynnettyjä numeerisia menetelmiä kontaktin mallinnuksessa.

2.3.1 Rangaistusmenetelmä

Kappaleiden välillä tapahtuva kontakti voidaan kuvata rangaistusmenetelmällä, jossa tapahtunutta kontaktia kuvataan rangaistusvoimilla. Tämän menetelmä perustuu kappaleiden väliseen tunkeumaan. Tunkeuman suuruuden avulla määritellään rangaistusvoiman suuruus. Kuvassa 10 on esitetty kahden eri kappaleen välille muodostuva tunkeuma. [11, s. 1]



Kuva 10. Kappaleiden välille syntyvä tunkeuma rangaistusmenetelmässä.

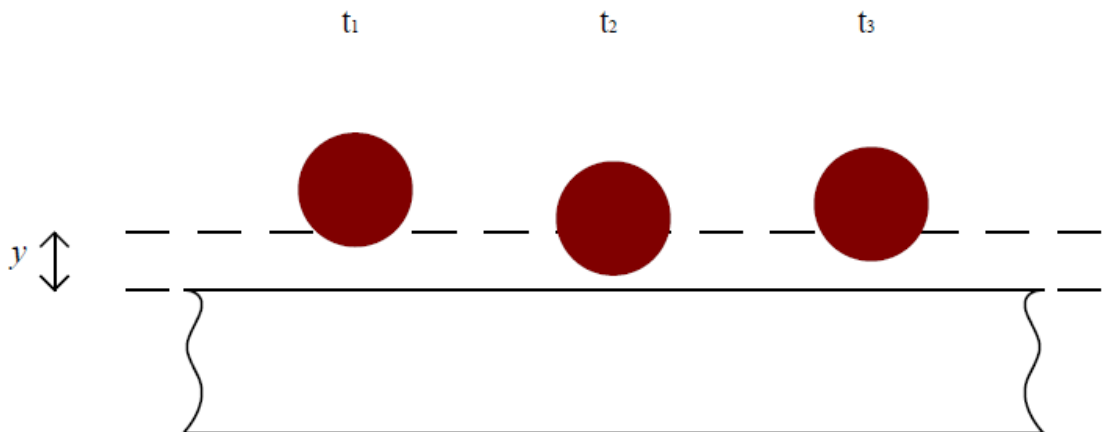
Tunkeumalla tarkoitetaan siis kahden eri geometrian päällekkäisyyttä, joka voidaan huomata kuvasta 10. Tunkeutuneen kappaleen alin kontaktipiste määrittää tunkeuman suuruuden, kuten kuvassa 10 on havainnollistettu. Näin ollen syntyvä rangaistusvoima F_{PM} voidaan siis määrittää kappaleiden tunkeuman y funktiona. Yhtälössä 1 on esitetty rangaistusvoiman yhtälö. Termi K rangaistusvoiman yhtälössä (YY) kuvaa kontaktin jäykkyyttä, joka määräytyy kappaleiden geometrioista ja materiaaleista. Tunkeuman eksponentti n vaikuttaa rangaistusvoimaan, kun tunkeuma kasvaa. Kyseisen arvon valintaan on perehdyttävä. Tyypillisesti eksponentin arvo on välillä 1..3. [12]

$$F_{PM} = Ky^n \quad (1)$$

Kontaktin kuvaus rangaistusmenetelmällä on verrattain yksinkertaista käyttää sillä kuvaus perustuu yhtälöön 1. Tätä voidaan pitää rangaistusmenetelmän suurimpana etuna. Menetelmän yksinkertaisuus on myös johtanut siihen, että kyseistä menetelmää on käytetty eniten kontaktien kuvauksissa. Toisaalta rangaistusmenetelmä on altis numeerisille virheille. Numeerisien virheiden syntyyn voi vaikuttaa esimerkiksi kappaleiden suuri törmäysnopeus tai aika-askelen suuruus. Lisäksi menetelmän herkkyys integrointiparametreihin vaikuttaa myös syntyviin virheisiin. [11],[12]

2.3.2 Rajoiteyhtälöt

Kappaleiden välillä tapahtuvaa kontaktia voidaan kuvata myös rajoitteiden avulla. Tässä menetelmässä kahden kappaleen geometriat ovat niin sanotusti toleranssin sisällä. Ja syntyvää kontaktia kuvataan rajoiteyhtälöiden avulla. Kuvassa 11 on esitetty kyseisen menetelmän periaatekuva. [12]



Kuva 11. Kappaleiden välinen toleranssialue kuvatessa kontaktia rajoiteyhtälöillä.

Verrattuna rangaistusmenetelmässä tapahtuvaan tunkeumaan niin tässä menetelmässä ei tunkeumaa tapahdu, joka voidaan huomata kuvasta 11. Tapahtuva kontakti huomioidaan muodostettaessa systeemin rajoiteyhtälöt, jotka ovat monikappalesysteemin perusta määrittäessä systeemin liikeyhtälöä. Rajoiteyhtälö kappaleelle voidaan määrittää yhtälöllä:

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (2)$$

missä, \mathbf{r} kuvaa kappaleen paikkaa avaruudessa
 \mathbf{R} kuvaa kappaleen lokaalin koordinaatiston sijainnin globaalissa koordinaatistossa
 \mathbf{A} määrittelee kappaleen orientaation avaruudessa
 $\bar{\mathbf{u}}$ kuvaa kappaleen sijainnin lokaalissa koordinaatistossa.

Huomioitaessa systeemin kontaktit, rajoiteyhtälöiden avulla, joudutaan määrittämään useita yhtälöitä ja muuttujia, jotta voidaan esittää tutkittava systeemi yhtälön 3 mukaisesti. Monikappalesysteemin liikeyhtälön perusmuoto voidaan esittää yhtälöllä:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{Cq}^T \\ \mathbf{Cq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \\ \mathbf{Q}_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

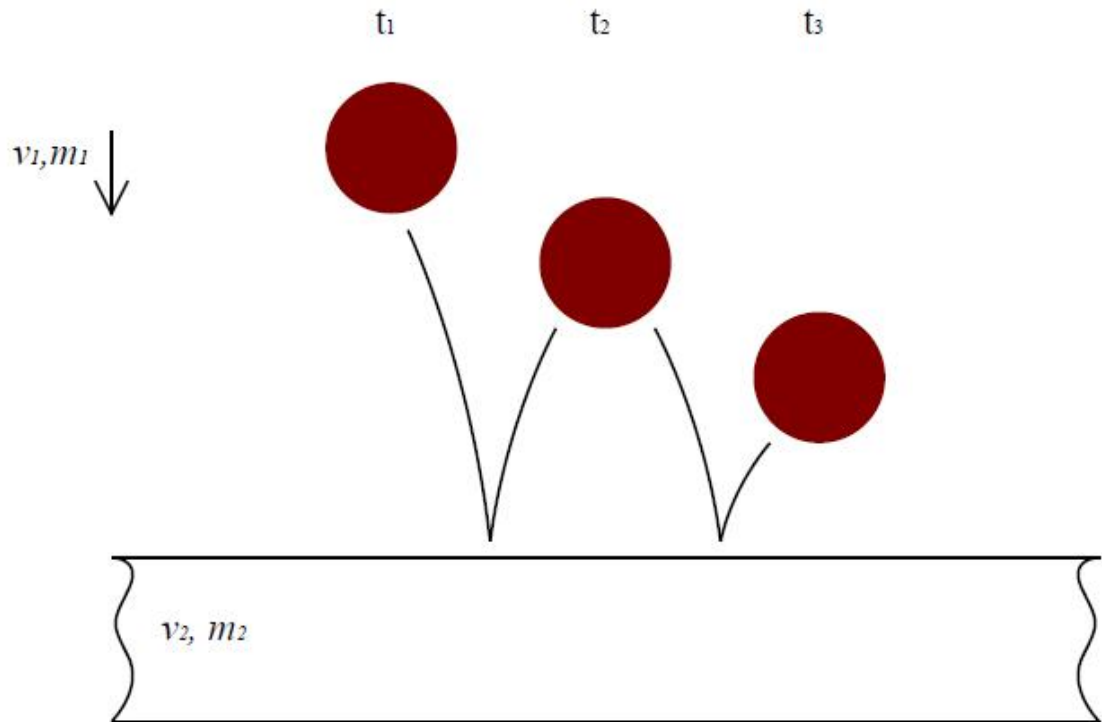
missä, \mathbf{M} on massamatriisi
 \mathbf{Cq} on Jacobian matriisi
 $\ddot{\mathbf{q}}$ sisältää yleistettyjen koordinaattien kiihtyvyydet
 λ on Lagrangen vakio
 \mathbf{Q}_e on yleistettyjen ulkoisten voimien vektori
 \mathbf{Q}_v on neliöllinen nopeusvektori
 \mathbf{Q}_c on rajoitteet sisältävä vektori.

Kontaktin kuvaus kyseisellä menetelmällä on suhteellisen stabiili numeerisessa mielessä. Menetelmällä onnistuu lepokontaktin kuvaaminen, johtuen jatkuvasta liikeyhtälön päivittämisestä. Toisaalta menetelmän haittapuolena on jatkuva liikeyhtälön päivittämisen tarve, joka tekee menetelmästä raskaan. Lisäksi kappaleiden irroittautuminen toisistaan on tällä menetelmällä vaikea kuvata. Kuten rangaistusmenetelmässä, aika-askeleella on merkitystä kontaktin kuvauksen tarkkuuteen. [12]

2.3.3 Sysäyskertoimet

Kontakteja voidaan myös tarkastella dynamiikasta tutuilla yhtälöillä. Dynamiikassa

kontaktit tai törmäykset kuvataan joko kimmoisina tai kimmottomina törmäyksinä. Olennaisina tekijöinä ovat kontaktin tapahtuessa kappaleiden massat ja nopeudet sekä kimmoisessa törmäyksessä sysäyskerroin. Sysäyskerroin määrittää kuinka kimmainen kappaleiden välinen törmäys on ollut. Kuvassa 12 on esitetty kahden kappaleen välinen kimmainen törmäys. [12]



Kuva 12. Sysäyskerroimen avulla kuvattu kappaleiden kontakti.

Tarkastelemalla kuvaa 12 havaitaan sysäyskerroimen vaikutus kappaleen liikkeeseen. Kuvassa 12 esitetystä esimerkistä kappaleen liike vaimenee. Kontakti voidaan määrittellä analyttisesti liikemäärän säilymlakia hyödyntäen. Kyseinen laki on esitetty yhtälössä 4.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (4)$$

Liikemäärän yhtälössä termit v ja u kuvaavat törmäävien kappaleiden alku- ja loppunopeuksia. Sysäyskerroin e voidaan määrittää hyödyntämällä alku- ja loppunopeuksia yhtälön 5 esittämällä tavalla tai kyseinen kerroin voidaan löytää kirjallisuudesta.

$$e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2}, 0 \leq e \leq 1 \quad (5)$$

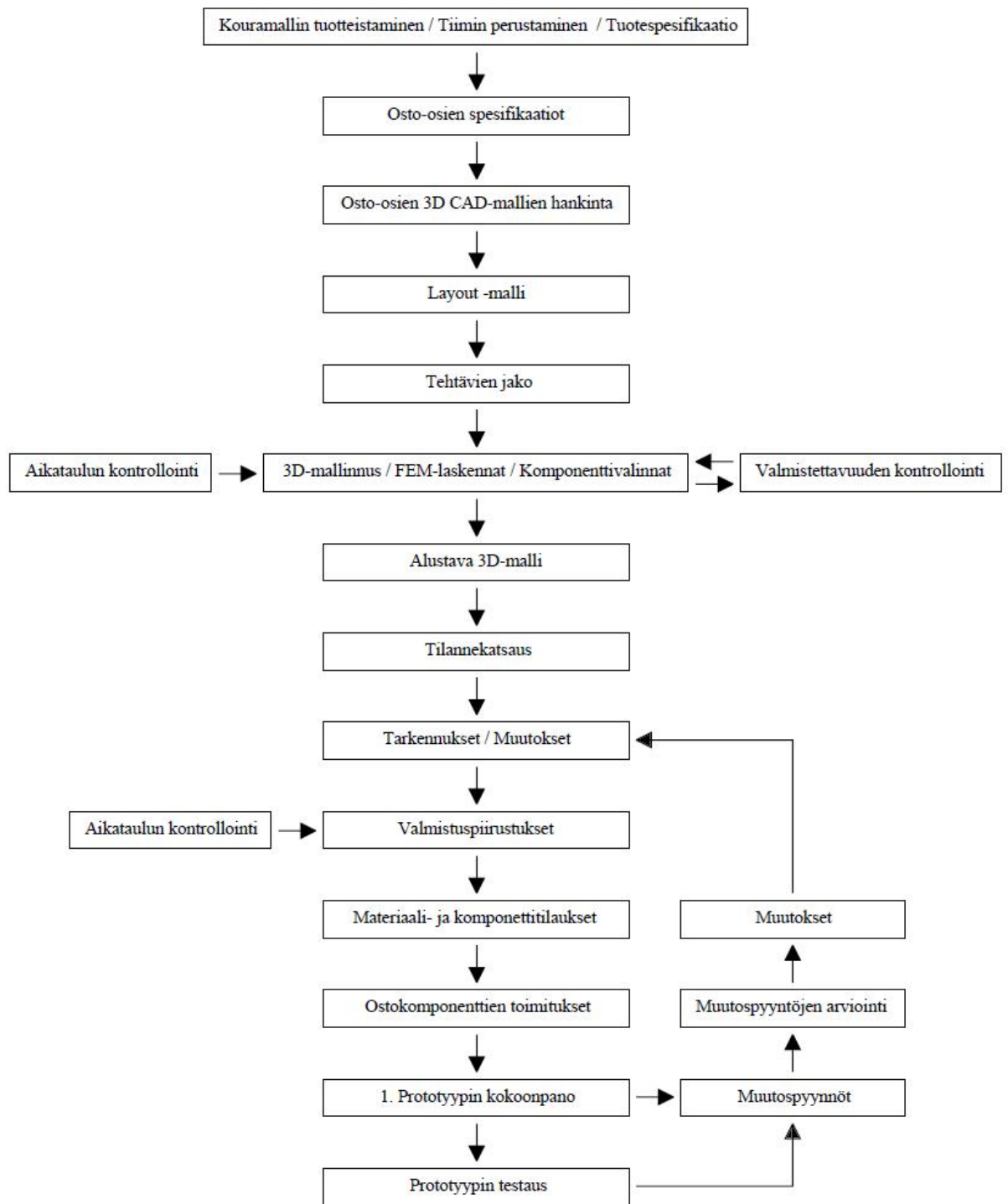
Kontaktin kuvaus sysäyskertoimien avulla on yksinkertaista. Edellisiin menetelmiin verrattuna sysäyskertoimien käyttö ei ole riippuvainen tunkeumasta tai toleranssista näin ollen kyseinen menetelmä ei ole riippuvainen myöskään aika-astelehen pituudesta. Menetelmää ei voida hyödyntää lepokontaktin kuvauksessa, sillä menetelmä vaatii kuvaukseensa liikemäärän. Lisäksi usean kontaktipisteen kuvaus on myös työlästä. [12]

3 VIRTUAALIMALLINNUS OSANA TUOTEKEHITYSPROSESSIA

Aiemmin kuvattu kirjallisuuteen pohjautuva tuotekehitysprosessi on vain ohjeellinen ja sen soveltuminen suoraan yrityksen hyödynnettäväksi ei ole kovin yleistä. Monissa tapauksissa prosessi räätälöityy yritykselle tai mikäli yritys on osa suurempaa kokonaisuutta voivat yrityksen tuotekehitysprosessin suuntaviivat määräytyä pääomistajan mukaan. Yhtäläisyyksiä tuotekehitysprosesseissa on kuitenkin havaittavissa. Tässä luvussa käydään läpi Waratah OM Oy:n tuotekehitysprosessi, johon kuuluu uustuotesuunnittelu- ja ylläpitosuunnitteluprosessit sekä tuotteen verifiointi ja validointi -prosessi.

3.1 Uustuotesuunnittelu

Uuden tuotteen suunnittelu jo prosessina on erittäin haastava ja pitkäkestoinen. Uustuotesuunnittelussa käytetään hyväksi mahdollisuuksien mukaan jo aiemmista tuotekehitysprojekteista tunnettua informaatiota. Jokaisella uudella tuotteella on omat ominaisuutensa, jotka määräytyvät hyvin pitkälti markkinoilta tulevan tiedon perusteella sekä millaiseen työympäristöön tuote on tarkoitettu. Kuvassa 13 on esitetty Waratah OM Oy:n uustuotesuunnittelun prosessikaavio.



Kuva 13. Yrityksen uustuotesuunnittelun prosessikaavio. [13]

Waratah OM Oy:n uustuotesuunnittelu alkaa kouramallin tuotteistamisella, suunnittelutiimin perustamisella ja tuotespesifikaation määrittämisellä, joka voidaan huomata kuvasta 13. Kouramallin tuotteistamisen lähtökohtana on asiakasvaatimukset tai markkinoiden tarve uudelle tuotteelle. Uusi kouramalli voi mahdollisesti myös korvata

poistuvan mallin. Tuotespesifikaatiossa määritellään kouramallin ominaisuudet ja siltä vaaditut toiminnot. Tämän vaiheeseen osallistuvat suunnittelijat, projektipäällikkö, Waratah OM Oy:n tuotekehityspäällikkö sekä John Deere Forestry'n harvestereista vastaava tuotekehityspäällikkö. [13]

Harvesteripäät sisältävät usein osto-osia, joista tyypillisimpiä ovat hydrauliset toimilaitteet. Näiden osien tuotespesifikaatioiden ja 3D CAD-mallien hankinnasta vastaa tuotekehitys yhdessä laatuinsinöörien kanssa. Hydraulisten komponenttien spesifikaatioita määritettäessä ja komponenttivalinnoissa on myös mukana hydraulikkaspecialisti. Laatuinsinöörit toimivat hyvin paljon yhteistyössä komponenttitoimittajien kanssa, jotta parhaiten soveltuvat komponentit löytyisivät käyttökohteisiin. Osto-osien tuotespesifikaatiot hyväksytetään suunnittelupäälliköllä ennen kuin näistä hankitaan CAD-mallit. [13]

Harvesteripästä luodaan alustava layout-malli, jossa ilmenee karkeasti toiminnot ja luonnokset geometriasta. Tämän perusteella tuotekehityspäällikkö jakaa suunnittelijoille tehtävät, jonka perusteella mekaniikan 3D-mallinnus voi alkaa. Layout-mallin yhteydessä harvesteripästä luodaan rakennepuu, jossa on eritelty selkeästi harvesteripään toiminnot ja mekaniikka. Rakennepuun laativat suunnittelijat sekä tuotekehityspäällikkö ja rakennepuun ylläpidosta huolehtivat suunnittelijat. Harvesteripään 3D-mallinnus on prosessin pitkäkestoinen vaihe. Tässä vaiheessa suoritetaan geometrian mallinnus, lujuuslaskennat ja komponenttivalinnat. 3D-mallinnuksessa harvesteripään osien valmistettavuutta kontrolloivat laatuinsinöörit suunnittelupäällikön kanssa. Lisäksi projektipäällikkö pyrkii pitämään projektia aikataulussa ja valvoo samalla kustannuksia. [13]

Kuvan 13 perusteella edellisen vaiheen tuotoksena on alustava 3D-malli. Tämä malli saattaa vielä sisältää kohtia, joita tullaan tarkentamaan tai tekemään muutoksia. Alustavan 3D-mallin valmistuessa luodaan tilannekatsaus koko projektiin. Tässä katsauksessa ovat läsnä kaikki tahot, jotka osallistuvat tähän projektiin. Katsauksessa kartoitetaan harvesteripään valmistettavuus sekä projektin aikataulut, resurssit ja kustannukset. Katsauksessa voi ilmenetä seikkoja, joihin puututaan ja tullaan tekemään muutoksia tai tarkennuksia välittömästi. [13]

Muutosten ja tarkennusten jälkeen voidaan aloittaa valmistuspiirustuksien luominen harvesteripään osista, joka voidaan havaita kuvan 13 perusteella. Suunnittelijat laativat

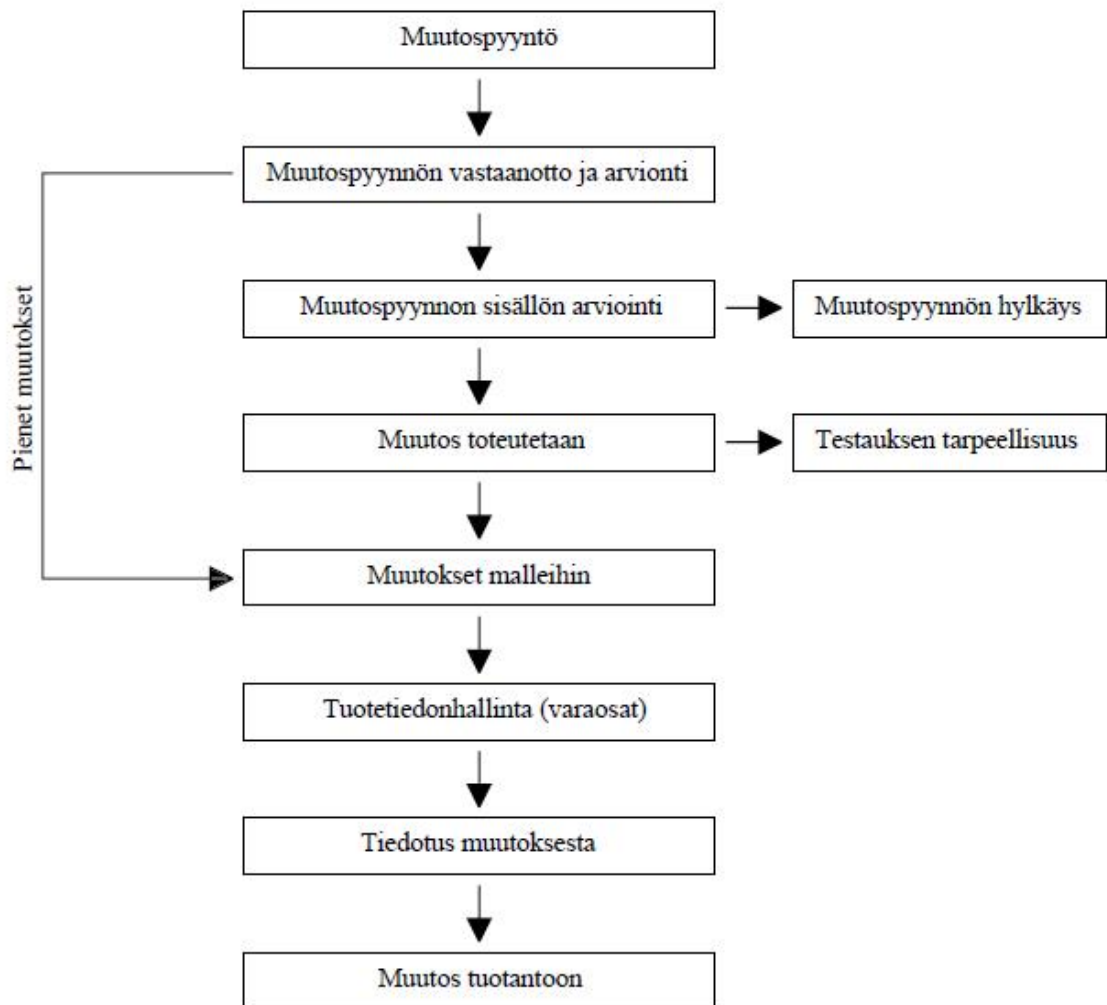
tarkat valmistus- ja kokoonpanopiirustukset valmistettavista osista. Projektipäällikkö kontrolloi prosessia, jotta projekti pysyisi aikataulussa ja päivittää alustavasti laadittua aikataulua ja kustannuksia tulevien materiaali- ja komponenttihankintojen takia. Hankintatoimi huolehtii materiaali- ja komponenttihankintojen hankinnasta projektipäällikön asettamien aikataulujen mukaisesti. [13]

Seuraavana vaiheena on ostokomponenttien vastaanottaminen tavarantoimittajilta. Nämä komponentit välitetään suoraan protoasentajille, jotka suorittavat ensimmäisen prototyypin kokoonpanon. Kuvan 13 perusteella seuraavana vaiheena heti kokoonpanon jälkeen on tuotteen testaus. Prototyypin kokoonpanossa ja testauksessa ilmenneet muutosehdotukset arvioidaan ja muutokset toteutetaan prosessissa kuvatulla tavalla. [13]

Tuote on valmis sarjatuotantoon, kun tuote on läpäissyt tuotteen verifiointi ja validointi -prosessin, joka on kuvattu kappaleessa 3.3. Ensimmäisen prototyypin kokoonpanon yhteydessä tuotannon toimihenkilöt tarkastavat luodut kokoonpano- ja asennusohjeet, jotta ohjeistusta voidaan mahdollisuuksien mukaan muokata. Tuotantoa joudutaan mahdollisesti organisoimaan uuden tuotteen läpivientiajan optimoimiseksi. [13]

3.2 Ylläpitosuunnittelu

Uustuotesuunnittelusta syntyneen tuotteen siirryttyä tuotantoon tapahtuu myös muutoksia suunnittelutiimin jäsenten työnkuvassa. Tuotteen ollessa tuotannossa voi ilmetä seikkoja, jotka vaativat suunnittelijan tekemään muutoksia tuotteeseen tai tuotteen erinäisiin osiin. Tätä kutsutaan ylläpitosuunnitteluksi. Uustuotesuunnittelun jälkeistä aikaa prototyyppien valmistuksesta lähtien voidaan myös pitää ylläpitosuunnitteluna. Kuvassa 14 on esitetty Waratah OM Oy:n ylläpitosuunnittelun prosessikaavio. [13]



Kuva 14. Yrityksen ylläpitosuunnittelun prosessikaavio. [13]

Ylläpitosuunnittelun aloittamisen lähtökohtana on muutospyyntö, kuten kuvasta 14 voidaan huomata. Tällä halutaan muuttaa jotain tuotteen komponenttia. Syitä muutospyynnölle ovat esimerkiksi kentällä havaitut ongelmat tai muutokset ostetuissa osissa. Tyypilliset tahot, joilta muutospyynnöt tulevat ovat asiakkaat, tuotannon työntekijät, tavarantoimittajat ja laadunhallinnan insinöörit. Tuotteessa voi ilmetä käytön aikana seikkoja, joita ei ole osattu huomioida suunniteltaessa tuotetta. Näin ollen asiakkaiden tekemät muutospyynnöt ovat erittäin tärkeitä. Tuotteen kokoonpanovaiheessa tuotannon työntekijöiltä voi tulla myös muutospyyntöjä, jotka helpottavat tuotteen kokoonpanoa. Muutospyynnön laatimiselle voi olla myös syynä komponenttitoimittajan vaihtuminen tai komponentin päivittyminen. Laadunhallinnan tekemät muutospyynnöt koskettavat tyypillisesti konstruktion materiaaleja ja ostos-

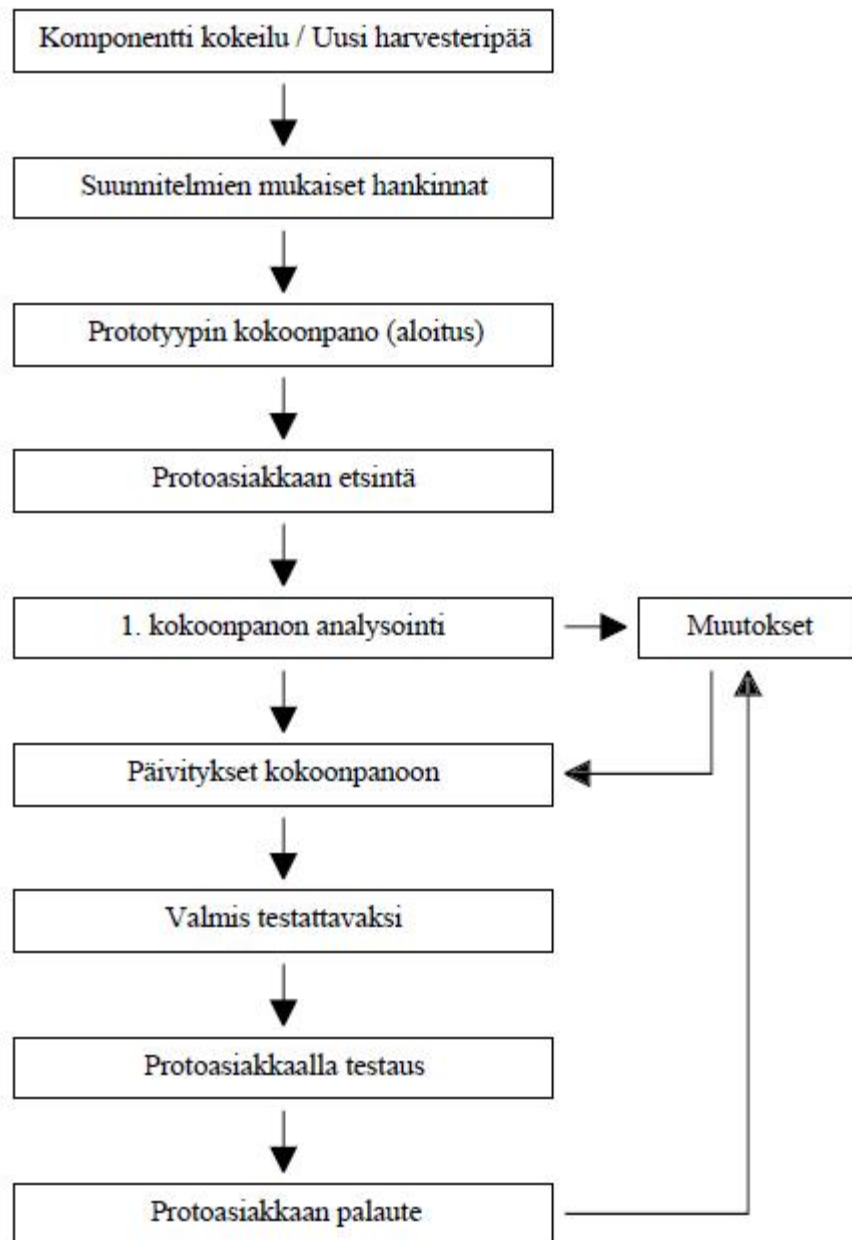
tulevien komponenttien tuomia ominaisuuksia. [13]

Tuotekehityspäällikkö vastaanottaa ja suorittaa alustavan arvioinnin muutospyyntölle, kuvassa 14 kuvatun prosessin mukaisesti. Mikäli kyseessä on niin sanotusti pienet muutokset voidaan muutokset päivittää malleihin suoraan. Tällaisia pieniä muutoksia voivat olla esimerkiksi valmistusta helpottavat geometriset päivitykset osaan. Mikäli kyseessä on suurempi muutospyyntö, jolla on merkittävä vaikutus tuotteeseen suoritetaan tarkempi arviointi, jossa muutospyyntöä tarkastellaan valmistettavuuden, taloudellisuuden ja hyödyllisyyden näkökulmista. Tämä tarkastelu suoritetaan suunnittelupäällikön johdolla ja mukana ovat laadunhallinnan insinöörejä ja suunnittelijoita. Tämän arvioinnin päätteeksi tehdään päätös muutospyyntön toteuttamisesta. [13]

Muutoksen toteutuessa tehdään myös päätös onko tarpeellista suorittaa testejä. Testejä voidaan suorittaa mahdollisesti, jos komponenttien toimittajat vaihtuvat. Suunnittelijan tehtävänä on päivittää muutokset CAD-malleihin ja valmistuspiirustuksiin sekä hoitaa tuotetiedonhallinnan päivittäminen ajantasalle. Muutosten päivittämisen jälkeen asiasta tiedotetaan laadunhallintaan, toimittajille ja tuotantoon. [13]

3.3 Tuotteen verifiointi ja validointi

Jatkumona uustuotesuunnittelussa suunnitellulle harvesteripäälle tai tämän osalle on prosessina tuotteen verifiointi ja validointi. Tuotteen verifiointin tarkoitus on tarkastella, että tehdäänkö tuote oikein täyttäen siltä vaaditut odotukset. Validoinnilla tarkoitetaan vastaavasti sitä, että onko tuote spesifikaation mukainen. Tämän prosessin aikana suunniteltu harvesteripää konkretisoituu valmistamalla tuotteesta prototyyppi. Uustuotesuunnittelun prosessikaaviota tarkasteltaessa voidaan huomata, että siellä on prosessin loppuvaiheessa tehtäviä, jotka kuuluvat tuotteen verifiointi ja validointi - prosessiin. Edellä mainittu prosessi on esitetty prosessikaaviona kuvassa 15. [13]



Kuva 15. Yrityksen tuotteen verifiointi ja validointi prosessi. [13]

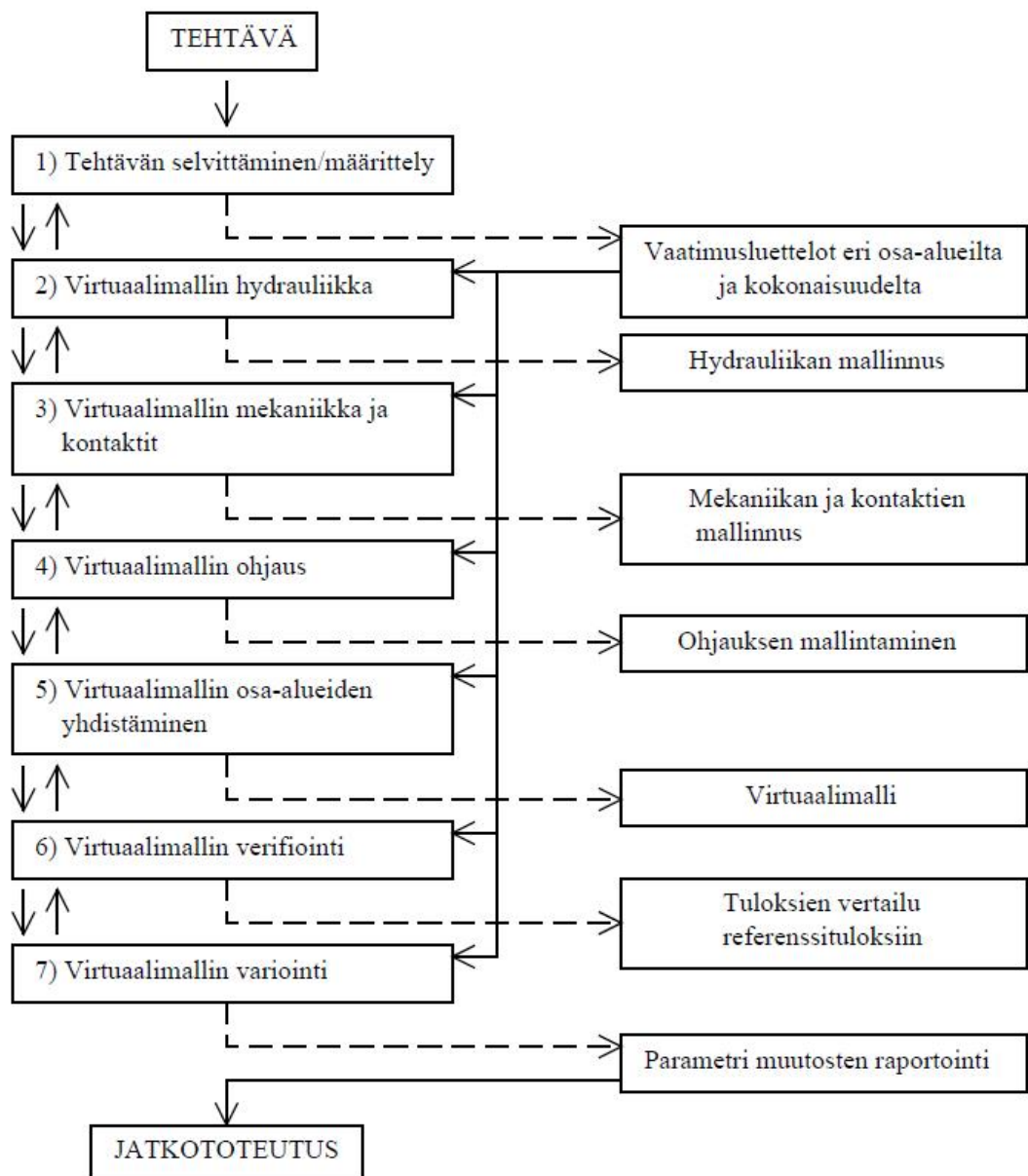
Tuotteen verifiointi ja validointi -prosessin käynnistäviä tekijöitä ovat komponenttikokeilut tai uuden harvesteripään tuotekehitys. Suunnittelun laatimien piirustusten pohjalta on valmistettu osat ja osakokoonpanot, joista aloitetaan tuotteen kokoonpano. Komponenttikokeilussa testataan mahdollista parannusta eri menetelmillä. Hankitaitoimi suorittaa suunnitelmien mukaisten komponenttien ja osien hankinnat. Nämä ovat kaksi ensimmäistä vaihetta, jotka voidaan huomata kuvassa 15 esitetyssä prosessikaaviosta. [13]

Kuvasta 15 voidaan huomata, että seuraava vaihe prosessissa on ensimmäisen prototyypin kokoonpanon aloitus. Tässä vaiheessa laaditaan prosessia valvovan tahon ja protoasentajien kanssa aikataulu, jonka mukaan kokoonpano suoritetaan sekä laaditaan projektidokumentti, jota päivitetään projektin kuluessa. Projektin valvovan tahon tehtävänä on myös etsiä mahdollinen protoasiakas, joka testaa tuotetta. Protoasiakkaan etsinnän jälkeen seuraava vaihe prosessissa on kuvan 16 perusteella kokoonpanon analysointi. Tässä vaiheessa saadaan tietoa rakenteesta, materiaaleista, yhteensopivuuksista, valmistettavuudesta sekä toiminnallisuudesta ja kokoonpantavuudesta. Protoasentajat antavat myös palautetta ja parannusehdotuksia suunnittelulle, joka käsittelee nämä muutospyyntöinä ja suorittavat mahdolliset päivitykset. Tuotekehitys on jatkuvasti läsnä näissä vaiheissa, erityisesti ensimmäisen kokoonpanon analysoinnissa. [13]

Kokoonpanon valmiusasteen ollessa riittävä tehtyjen muutosten ja päivitysten jälkeen on tuote valmis testattavaksi. Päätöksen tästä tekee valvova taho. Seuraavassa vaiheessa tuote toimitetaan protoasiakkaalle kuvassa 15 esitetyn prosessin mukaisesti. Protoasiakas testaa tuotetta kokonaisuutena ja antaa palautetta kokemuksistaan ja mahdollisia parannusehdotuksia. Kyseiset parannusehdotukset käsitellään tuotekehitystiimin keskuudessa ja saatujen testaustuloksien perusteella tehdään muutoksia piirustuksiin ja valmistussuunnitelmiin. [13]

3.4 Virtuaalimallinnus prosessina

Virtuaalimallinnuksen sijoittaminen osaksi yrityksen tuotekehitysprosessia, jolla on pitkäaikainen kokemus ja rutinoitunut tapa suunnitella harvesteripäitä on haastavaa. Edellä kuvattuja yrityksen keskeisiä tuotekehitykseen liittyviä prosesseja tarkastellen voidaan huomata, että näiden prosessien välillä on jatkumo. Tämän jatkumon vahvistamiseksi ja optimoimiseksi on mahdollista lisätä virtuaalimallinnus näiden prosessien rinnalle niin sanotuksi omaksi työkaluksi. Kuvassa 16 on esitetty virtuaalimallinnuksen prosessikaavio.



Kuva 16. Virtuaalimallinnuksen prosessikaavio.

Virtuaalimallin prosessikaaviota määritettäessä on hyödynnetty järjestelmällisen tuotekehitysprosessin prosessikaavion runkoa, joka voidaan huomata vertailemalla kuvia 3 ja 16. Kuvaa 16 tarkastelemalla voidaan huomata virtuaalimallinnuksen jakautuminen eri vaiheisiin. Määriteltäessä virtuaalimallinnuksen vaiheiden kulkua on huomioitu Waratah OM Oy:n aiemmin tässä työssä kuvatut tuotekehitykseen liittyvät prosessit.

Ensimmäisenä vaiheena, kuvan 16 mukaisesti, on määritellä virtuaalimallinnuksen tehtävän laajuus ja sen kohde. Vaiheen tuloksena on laadittu vaatimusluettelo osa-

alueista kuten myös kokonaisuudesta. Tehtävän selvittäminen ja määrittely kannattaa suorittaa tuotekehitysprojektin alussa, jossa määritellään tuotteen spesifikaatio. Virtuaalimallinnusta voidaan hyödyntää myös työkaluna irroitettuna tuotekehitysprojektista jolloin tutkitaan tiettyä osa-aluetta tuotteesta.

Seuraavana vaiheena virtuaalimallin prosessikaaviossa, kuva 16, on virtuaalimallin hydrauliiikan määrittely. Tässä vaiheessa määritellään mallinnettava hydrauliiikkapiiri ja sen sisältämät komponentit sekä kytkökset ohjaukseen ja mekaniikkaan. Virtuaalimallin hydrauliikkamallinnus tulisi aloittaa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, sillä hydrauliiikan mallinnus on aikaa vievä prosessi. Tarkasteltaessa uustuotesuunnittelun prosessikaavioita, kuva 13, tulisi hydrauliiikan mallinnus aloittaa siinä vaiheessa, kun tuotespesifikaatio harvesteripäästä on tiedossa sekä osto-osien spesifikaatiot. Hydrauliikkakomponenttien ollessa osto-osia korostuu yhteistyö komponenttien tarjoajan kanssa. Hydrauliiikan mallinnukseen vaikuttavat myös käytettävä mallinnustapa, hyödynnettävä ohjelmisto sekä jo olemassa olevat komponentit. Mallinnuksessa tulisi huomioida, että mallin komponenttien parametrit olisivat mahdollisimman kattavasti parametrisoitavissa. Hydrauliikkamallin valmistuessa on mahdollista tutkia eri parametrien vaikutusta muihin hydrauliikkamallin komponenttien käytöksiin.

Kolmantena vaiheena virtuaalimallinnuksessa on kuvan 16 perusteella virtuaalimallin mekaniikan ja kontaktien määrittäminen. Kyseisessä vaiheessa määritellään mallinnettavan mekaniikan laajuus sekä tehdään päätös kontaktien mallinnuksesta. Tarkasteltaessa aiemmin kuvattua yrityksen uustuotesuunnittelua, kuva 13, voidaan todeta, että harvesteripään mekaniikan mallinnus ja kehitys on jatkuvaa projektin aikana. Mekaniikan virtuaalimallinnus voidaan aloittaa välittömästi, mikäli virtuaalimallinnusta hyödynnetään irrallisena työkaluna tuotekehitysprojektista. Oletuksena tässä tietenkin on 3D CAD -geometrian saatavilla olo jo virtuaalimallinnuksen alussa. Mekaniikan CAD-mallinnuksen ja mekaniikan simuloinnin rinnakkain työskentelyä vaikeuttaa mekaniikkamallin jatkuva päivittyminen tuotekehitysprojektin aikana, erityisesti prosessin alkuvaiheessa. Mekaniikan simulointi tulisi näin ollen ajoittaa tuotekehitysprojektin kannalta sellaisiin tilanteisiin, jossa malli kyseisen komponentin, osakokoonpanon tai kokoonpanon osalta ei muutu merkittävästi.

Kontaktien mallinnuksen osuus kolmannessa vaiheessa tulisi ajoittaa heti mekaniikan mallinnuksen jälkeen. Kontaktien mallinnukseen vaikuttaa käytettävä ohjelmisto, jolla virtuaalimallin mekaniikka mallinnetaan sekä ohjelmiston hyödyntämät kontaktien mallinnusmenetelmät. Metodien ideologian tiedostaminen helpottaa oikean mallinnusmenetelmän valintaa kullekin kontaktille. Tähän tosin vaikuttavat käytössä oleva ohjelmisto sekä onko mahdollista hyödyntää useampia metodeja. Oikean metodin valinnalla voidaan vaikuttaa laskenta-ajan kesto. Kontaktien mallinnuksella pyritään hakemaan realistisuutta virtuaalimalliin, mutta kappaleiden välisten kontaktien kuvauksessa täytyy olla kriittinen.

Viimeisenä mallinnettavana osa-alueena virtuaalimallinnuksessa on ohjauksen määrittäminen, joka on neljäs vaihe kuvassa 16 esitettyssä prosessikaaviossa. Ohjausjärjestelmä on tyypillisesti tarkoitus liittää hydrauliikkapiiriin suuntaventtiileihin, joilla ohjataan harvesteripään toimilaitteita ja toimintasuuntia. Tyypillisesti tämä vaihe mallinnuksesta tulee suunniteltua ja osittain toteutettua hydrauliikan mallinnuksessa ja tarkemmin suuntaventtiilien yhteydessä. Komponenttien testauksen yhteydessä tarvitaan alustavan laatuinen ohjesignaali mallinnettavalle komponentille ja näin ollen on luotu pohjustus ohjausjärjestelmälle. Ohjausjärjestelmästä tulisi luoda mahdollisimman oikeata systeemiä vastaava, mutta usein joudutaan virtuaalimallia varten tekemään yksinkertaisuuksia. Tyypillisesti monet toiminnot yhdistyvät toisiinsa tai ovat riippuvaisia toisistaan työkierron aikana. Eli automaation ja tämän tason merkitys mallinnuksen yhteydessä täytyy huomioida. Virtuaalimallinnuksen pääpainon ollessa mekaniikan ja hydrauliikan mallinnuksessa voidaan ohjausjärjestelmä laatia aluksi yksinkertaiseksi, jolloin sitä voidaan myöhemmin kehittää ja toimintojen riippuvuudet voidaan suorittaa yksinkertaisilla loogisilla operaatioilla.

Kuvan 16 perusteella viides vaihe virtuaalimallinnuksessa on eri osa-alueiden yhdistäminen. Mikäli erillisiä ohjelmistoja on hyödynnetty virtuaalimallin luonnissa täytyy rajapinnat näiden ohjelmistojen välillä yhdistää. Jo tehtävää määriteltäessä on tiedostettava eri ohjelmistojen yhteensopivuus, jotta virtuaalimallinnus voidaan aloittaa. Rajapintojen yhdistämisen jälkeen voidaan puhua virtuaalimallista. Seuraavana vaiheena on virtuaalimallin verifiointi, kuten kuvasta 16 voidaan huomata. Tämän vaiheen tarkoituksena on verrata virtuaalimallin käytöstä mitattuun dataan ja mahdollisesti säätää virtuaalimallin parametreja referenssidatan perusteella.

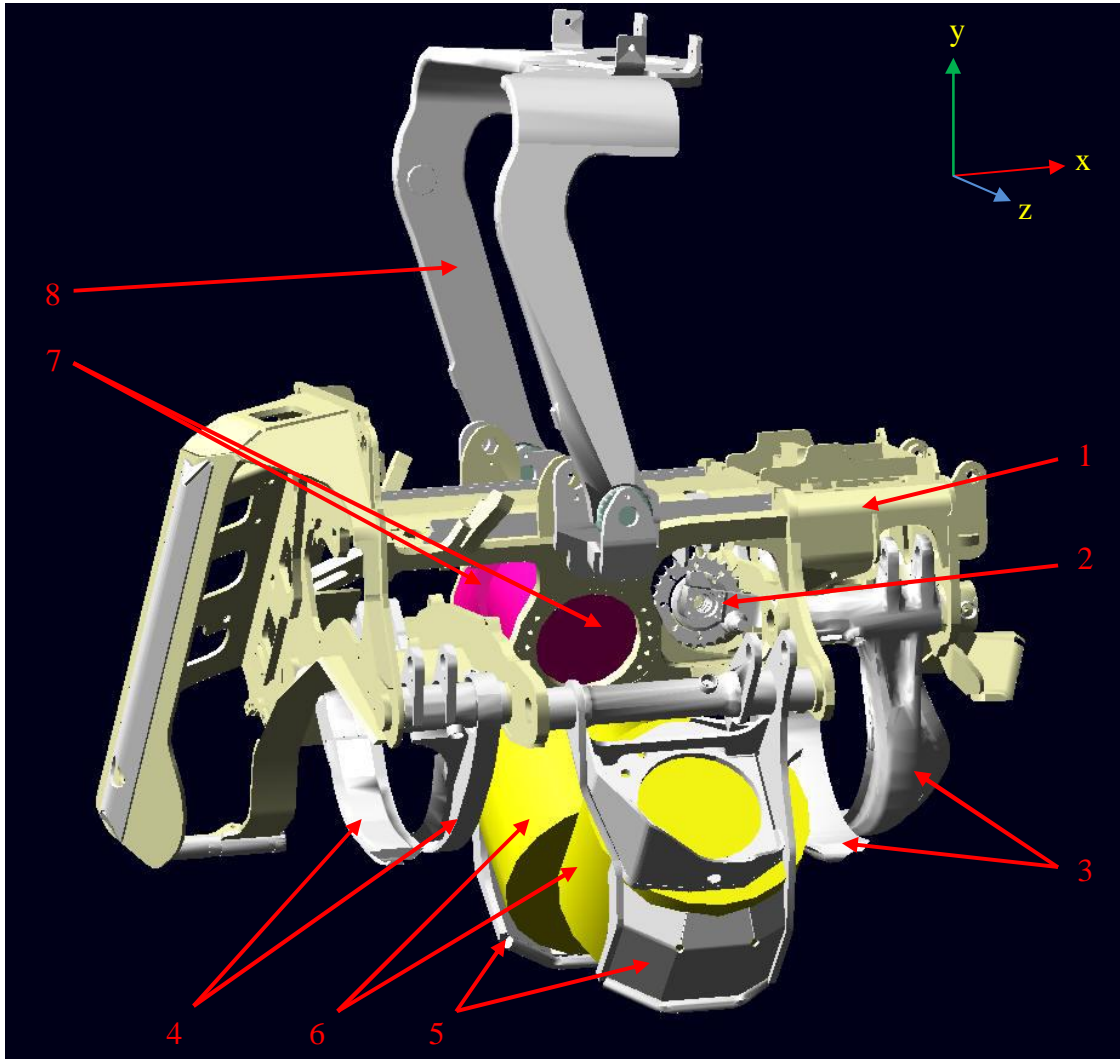
Seitsemäntenä vaiheena kuvan 16 perusteella on virtuaalimallin variointi. Tässä vaiheessa varioidaan virtuaalimallin parametreja ja tarkastellaan varioitujen parametrien vaikutusta virtuaalimallin käytökseen. Virtuaalimallin osa-alueista hydraulikan parametrit tulisi parametrisoida mahdollisimman kattavasti ja helposti varioitaviksi. Parametrien varioitavuuteen vaikuttaa myös käytettävä(t) ohjelmisto(t). Mikäli tehdyillä parametrimuutoksilla havaitaan olevan vaikutusta raportoidaan tästä ja harkitaan mahdollisia jatkotoimenpiteitä muutosten suhteen. Tässä vaiheessa on myös mahdollisuus kokeilla muiden hydraulikkakomponenttien vaikutusta piirissä, mutta tämä vaatii kyseiseltä komponentilta verifioituja tuloksia.

4 HARVESTERIPÄÄN VIRTUAALIMALLI

Tässä luvussa havainnollistetaan H414-harvesteripäästä luotu virtuaalimalli sekä virtuaalimalliin kuuluvat osa-alueet. Virtuaalimalli luodaan hyödyntämällä harvesteripään 3D CAD-geometriaa, pituusmittalaitteen hydraulikkapiirikaaviota sekä puun ja harvesteripään kontaktipintoja tutkien. Harvesteripää sisältää paljon osia, joten komponenttien määrä joudutaan minimoimaan olennaisimpiin komponentteihin. Virtuaalimallin luomisessa hyödynnetään kaupallisia ohjelmistoja, joiden välille luodaan yhteys tutkittaessa osa-alueiden vaikutuksia toisiinsa.

4.1 Mekaniikkamalli

H414 -harvesteripää on tuotannossa ja kyseisestä tuotteesta löytyy viimeisin mekaniikkamalli Pro/ENGINEER 3D CAD-ohjelmistolla. Mallin päivittämisestä syntyviä ongelmia ei pitäisi ilmetä, mitä mahdollisesti ilmaantuisi vasta tuotekehitysvaiheessa olevan harvesteripään mekaniikkamallissa. Tuotekehitysvaiheessa olevaan harvesteripään mekaniikkamalliin tehdään jatkuvasti muutoksia tuotekehitysprojektin aikana. Kuvassa 18 on esitetty H414 virtuaalimallin mekaniikka MSC Adams 2010 -ohjelmistossa.



Kuva 17. Virtuaalimallin mekaniikkamalli.

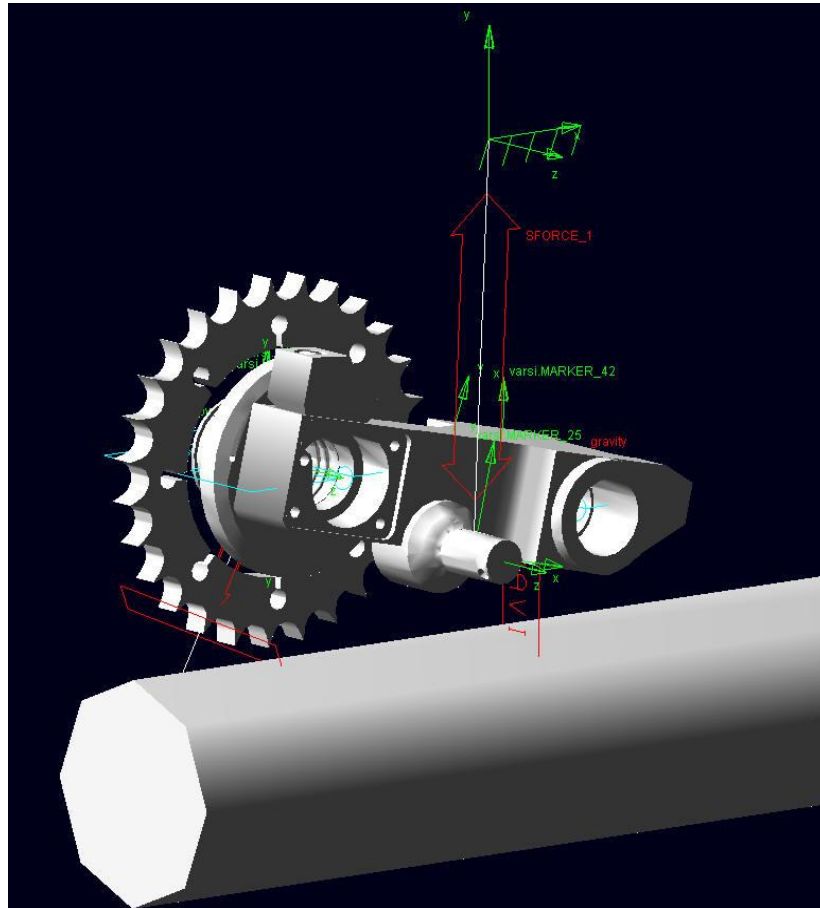
H414:n mekaniikkamallia on jouduttu karsimaan olennaisimpiin jäseniin, kuten kuvasta 17 voidaan huomata. Tällä on pyritty pienentämään laskenta-aikaa. Mallista voidaan erottaa harvesteripäähän kuuluvat tärkeimmät mekaaniset osat. Taulukossa 2 on eritelty tarkemmin, mitä osia virtuaalimallin mekaniikka sisältää. Kuvasta 17 voidaan myös huomata, että syöttömoottorien rullat on yksinkertaistettu mallintamalla nämä pelkillä sylinterimäisillä geometrioilla hyödyntämällä käytössä olevaa monikappaledynamiikan ohjelmistoa.

Taulukko 2. Virtuaalimallin mekaaniset osat.

Osanumero	Selvennys
1	Runko
2	Pituusmittalaite
3	Yläterä
4	Alaterä
5	Rullarunko
6	Syöttömoottorin rulla (ala)
7	Syöttömoottorin rulla (ylä)
8	Tilttisanka

Siirrettäessä 3D CAD-geometrian tieto ohjelmistosta toiseen täytyy huomioida massa- ja inertiatietojen päivittyminen ohjelmistojen välillä. Mekaniikkamallin koostuessa muutamasta osasta on päätetty lisätä harvesteripään loppu massa rungon massakeskipisteelle.

Pituusmittalaite koostuu mittavarresta, mittapyörästä, mittavartta liikuttavasta 2-toimisesta hydraulisyylinteristä ja puun pituutta mittaavasta anturista. Kuvassa 18 on havainnollistettu pituusmittalaitteen toteutus mekaniikkamallissa.



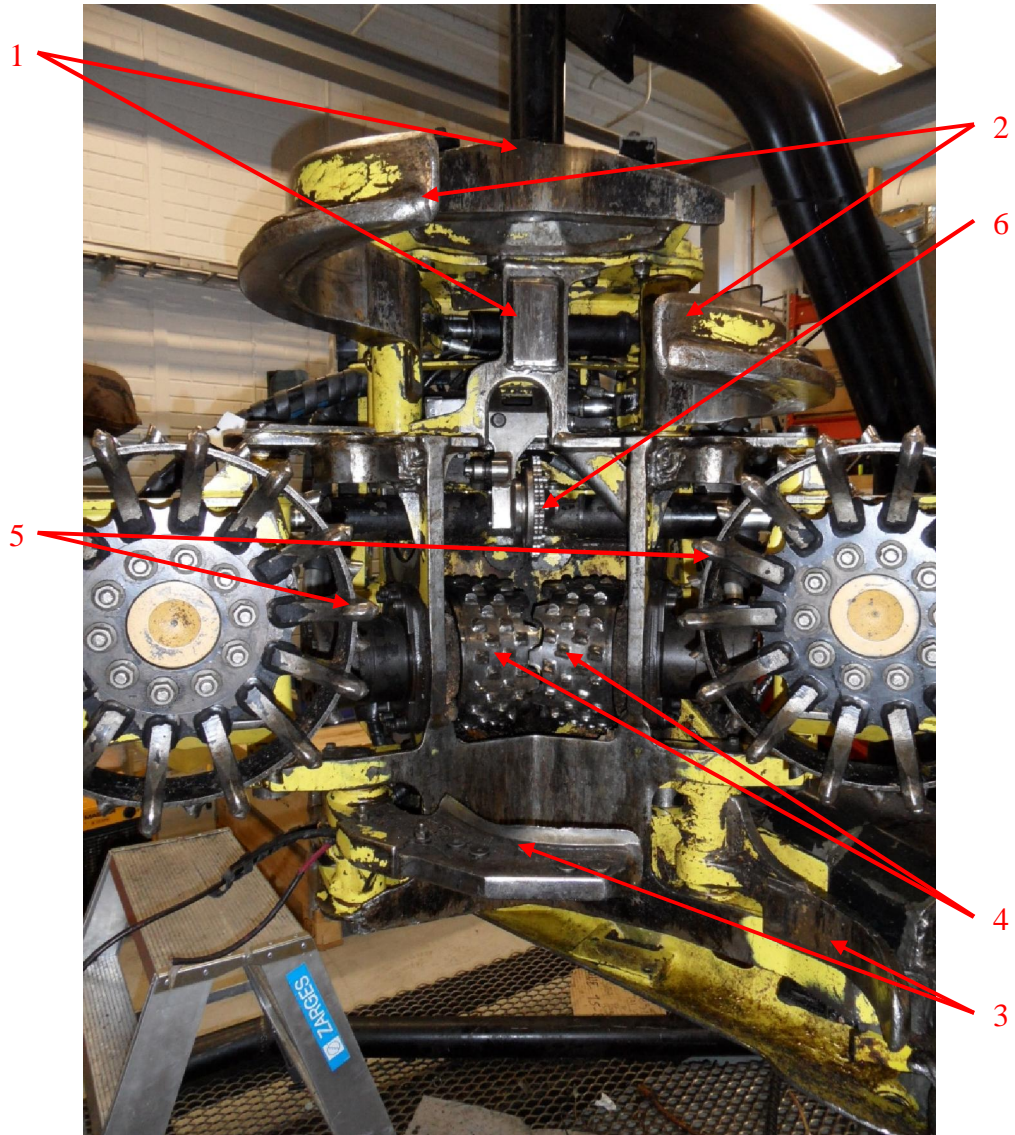
Kuva 18. Pituusmittalaitteen mekaniikka yksinkertaistettuna.

Kuvasta 18 voidaan huomata, että hydraulinen sylinteri on korvattu luomalla hydraulisyylinterin nivelpisteiden välille voimakomponentti. Tällä menettelyllä on pyritty pienentämään laskenta-aikaa vähentämällä mekaniikkamallin osien lukumäärää. Nivelpisteiden välille luodun voimakomponentin voima määräytyy hydraulikkamallin sisältämän hydraulisyylinterin perusteella, joka välittää tiedon hydraulikkamallista mekaniikkamallin voimakomponentille.

4.2 Kontaktit

Harvesteripään prosessoidessa puuta kontaktit ovat merkittävässä roolissa. Puun prosessoinnin kannalta tärkeimmät kontaktit ovat karsimateriaien ja rungon muodostamat kontaktit puuhun, jotta lopputuote olisi haluttu. Puun täytyy liukua runkoa vasten, jotta karsimaterät saisivat mahdollisimman tehokkaasti karsittua puun oksista yhdellä työkierrolla. Puun liike, joka on harvesteripään suuntainen, toteutetaan hydraulisilla syöttömoottoreilla ja näin ollen syöttömoottorien rullien ja puun välille muodostuu

kontaktit. Syöttömoottorien ja puun välisillä kontakteilla on myös merkitys prosessoinnin tehokkuuden kannalta. Mittaustarkkuuden kannalta tärkeimpänä kontaktina voidaan pitää pituusmittalaitteen mittapyörän ja puun välistä kontaktia. Tällä kontaktilla on suora vaikutus mittapyörän sisältämään anturiin, joka määrittää puun pituuden. Kuvassa 19 on esitetty harvesteripään ja puun väliset kontaktit.



Kuva 19. Harvesteripään ja puun väliset kontaktit.

Kuten kuvasta 19 voidaan huomata kontaktissa olevia osia on useita puun prosessoinnin aikana. Tosin kuvasta ei ilmene aivan kaikki kontaktiparit. Taulukossa 3 on esitetty puun prosessoinnin kannalta tärkeimmät kontaktiparit, jotka huomioidaan virtuaalimallissa.

Taulukko 3. Simulointimallissa ilmenevät kontaktit.

Numero	Kontaktipari
1	Runko - Puu
2	Yläterät - Puu
3	Alaterät - Puu
4	Ylä syöttömoottorien rullat - Puu
5	Ala syöttömoottorien rullat - Puu
6	Mittapyörä - Puu
7	Puu - Maa
8	Tilttisanka - Runko
9	Pituusmittalaitteen varsi - Runko

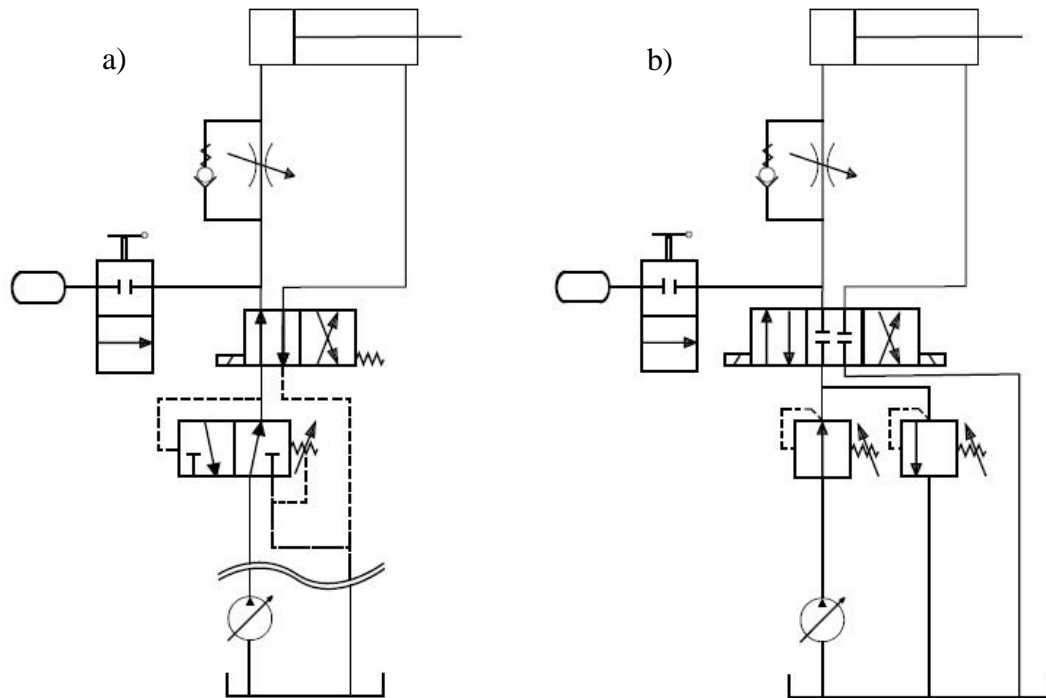
Taulukkoa 3 tarkastellessa ilmenee kontaktipareja, jotka eivät ilmene kuvasta 19. Tällaisia kontaktipareja ovat puu-maa -, pituusmittalaitteen varsi-runko - ja tilttisanka-runko -kontakti. Puuta prosessoidessa puu raahautuu latvastaan maata vasten. Runko sisältää mekaaniset rajoitteet pituusmittalaitteen liikeradan ääriasennoille sekä myös tilttisangalle. Oikeassa tilanteessa näiden kahden kontaktin tarkoituksena on suojella mekaniikkaan liittyviä toimilaitteita.

Virtuaalimallin kontaktien luonnissa on hyödynnetty MSC Adams 2010 -ohjelmistoa, jolla on kuvattu myös harvesteripään mekaniikka. Kontaktien mallinnus kappaleiden välille kyseisellä ohjelmistolla on yksinkertaista, mutta parametrien määrittäminen on haastavampaa. Edellä mainitussa ohjelmistossa on kaksi tyyppiä kuvata kontakti, mikäli mukaan ei lasketa rengasmalleissa käytettäviä tapoja kuvata kontakteja. Kontaktit voidaan siis kuvata geometrien välillä joko rangaistusmenetelmän tai sysäyskertomien avulla. Kyseisten metodien ideologia on esitetty aiemmin tässä työssä.

4.3 Hydrauliiikan mallinnus

Hydraulijärjestelmät voidaan ajatella tehonsiirtoketjuina, jossa mekaaninen teho muunnetaan hydrauliseksi [14, s. 1]. Hydraulinen teho välitetään haluttuun osioon järjestelmässä ja muunnetaan takaisin mekaaniseksi, jota sovellutus käyttää [14, s. 1]. Hydraulijärjestelmä sisältää useita komponentteja, joita voidaan mallintaa eri tavoilla. Näitä tapoja ovat analyyttinen, empiirinen tai puoliempiirinen. Analyttisesti mallinnetulle komponentille on ominaista, että mallin parametrit ovat yleisesti tunnettuja fysiikan vakioita tai ne ovat fyysisesti mitattavissa. Parametrit määritetään tyypillisesti tunnettujen yhtälöiden mukaan tai kokeellisesti. Empiirinen malli perustuu mitattauksiin ja tästä saatuun informaatioon. Tässä tavassa huomioidaan vain malliin tulevat suureet ja mallista lähtevät suureet. Empiirinen malli vaatii aina kokeellisen järjestelmän rakentamisen sekä useat mittaukset eri kohteissa järjestelmää ja erilaisilla työkiertoilla. Puoliempiiristä mallinnustapaa voidaan pitää kahden edellisen tavan yhdistelmänä. Tämän mallin pohjana on analyyttisestä tavasta tutut yhtälöt, josta voidaan tunnistaa testatun järjestelmän parametreja. [15, s. 18-19]

Harvesteripään pituusmittalaitteen hydraulipiiri mallinnetaan hyödyntämällä MATLAB 2009b -ohjelmistoa sekä tämän Simulink -ominaisuutta. Mallinnustapana käytetään puoliempiiristä mallinnustapaa. Kuvassa 20 on esitetty mallinnettavan järjestelmän hydraulipiiri.

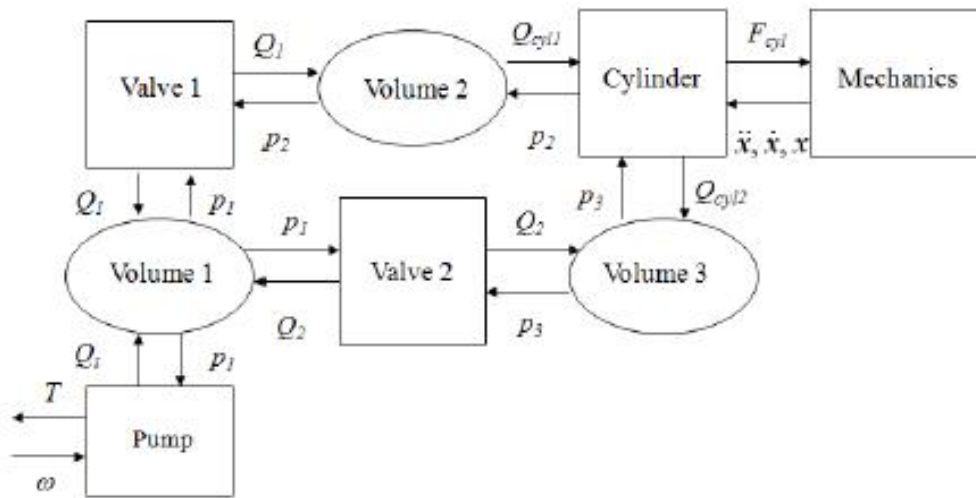


Kuva 20. Mallinnettava piiri. a) Virallinen piiri, b) Yksinkertaistettu piiri.

Hydraulipiiriä joudutaan yksinkertaistamaan mallinnusta varten. Koko harvesteripään hydraulipiiri on erittäin monimutkainen kokonaisuus. Kuvassa 20 vasemmalla on esitetty pituusmittalaitteen virallinen hydraulipiiri. Samassa kuvassa oikealla on esitetty vastaavasti yksinkertaistettu piiri. Yksinkertaistetun piirin eroina voidaan havaita suuntaventtiilin asentojen eri lukumäärä, mutta tällä ei ole vaikutusta venttiilin toimintaan ja kyseistä asentoa ei käytetä simuloinnissa. Lisäksi erona voidaan havaita 3-tiepaineenalennuksen mallinnus paineenalennus- ja paineenrajoitusventtiilinä. Kyseinen 3-tiepaineenalennusventtiili sisältää paineenrajoitustoiminnon, joten mallintaminen kahtena eri komponenttina todettiin parhaaksi tavaksi mallintaa kyseinen komponentti. Harvesteripää saa paineensa peruskoneen pumpulta ja päättyy lopulta harvesteripään toimilaitteille erinäisiä reittejä pitkin. Toimilaitteilla on erilaiset työsyklit ja painevaatimukset. Yksinkertaistetussa mallissa on ajateltu pituusmittalaitteen hydrauliliikkapiirille tulevan jatkuvasti ko. piirille sille määrätty paine, jonka tuottaa pumppu.

4.3.1 Puoliempiirinen mallinnus

Hydraulipiiriä mallinnettaessa puoliempiirisesti voidaan piiri jakaa komponentteihin ja näiden välisiin tilavuuksiin. Komponentit mallinnetaan hyödyntäen analyttisiä yhtälöitä, mittausdataa ja komponenttivalmistajien ilmoittamia parametrejä. Tilavuudet komponenttien välissä koostuvat letkuista ja/tai putkista. Lisäksi puoliempiirisessä tavassa voidaan erottaa rajapinnat, joissa hydraulipiiri yhdistyy mekaniikkaan ja päinvastoin. Kuvassa 21 on esitetty erään systeemin puoliempiirinen esitys. [16, s. 11]



Kuva 21. Erään hydraulikkapiirin puoliempiirinen esitys. [16, s. 12]

Kuvasta 21 voidaan huomata, että komponenttien ja tilavuuksien välillä välittävät paine- ja tilavuusvirtatieto. Komponentit määrittävät sisääntulevan ja ulosmenevän tilavuusvirran, kun taas tilavuudet määrittävät tilavuusvirtojen perusteella komponenttien välillä vallitsevat paineet. Kuvasta 21 voidaan myös havaita hydraulipiirin rajapinnat ja kuinka nämä yhdistyvät mekaniikkaan. Pumpun esimerkiksi voi pyörittää dieselmoottori tietyllä kierrosnopeudella, josta määräytyy pumpun tuotto. Sylinterin tuottama voima liikuttaa esimerkiksi mekaanista jäsentä, josta päivittyy asema, nopeus tai kiihtyvyydestieto takaisin sylinterille ja piirille. Puoliempiirisellä ajatustavalla voidaan luoda mille tahansa hydraulipiirille kuvan 21 kaltainen esitys.

4.3.2 Komponenttien mallinnus puoliempiirisesti

Aiemmin kuvassa 20 on esitetty harvesteripään pituusmittalaitteen hydraulipiiri, joka koostuu muutamasta komponentista. Näiden komponenttien kuvaukset yhtälötasolla puoliempiirisellä mallinnustavalla esitetään seuraavissa kappaleissa.

Pumppu

Mekaaninen energia muutetaan hydrauliseksi energiaksi hydraulipumpun avulla. Pumput syrjäyttävät tietyn verran nestettä ja tämän syrjäytyneen nesteen suuruus riippuu pumpun kammion suuruudesta. Kyseinen komponentti ei tuota painetta vaan tilavuusvirran. Yhtälössä 6 on esitetty teho P vakiotilavuuspumpulle. [14, s. 78 & s. 137]

$$P = Q \cdot p \quad (6)$$

Pumpulla on tietty maksimituotto Q_{\max} , jota suurempi tuotettu tilavuusvirta ei voi olla. Hyödyntämällä yhtälöä 6 ja pumpun maksimituottoa voidaan vakiotilavuuspumpun tuottama tilavuus esittää yhtälön 7 avulla. [17]

$$Q_p = \begin{cases} \frac{P_{\max} \cdot \eta}{p_p} \\ Q_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

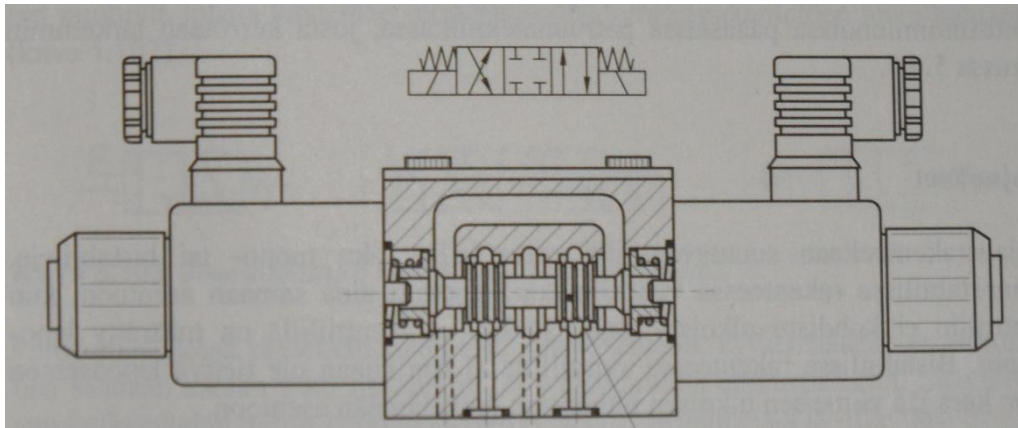
Säätötilavuuspumpun tilavuusvirta voidaan esittää ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöllä. Yhtälössä 8 on oletettu, että pumpun tuottama tilavuusvirta on lineaarinen funktio, joka muodostuu asetuspaineen p_{ref} ja säädettävän paineen erotuksesta. Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista tilavuusvirta. [17]

$$\dot{Q}_p = \frac{k(p_{\text{ref}} - p_p) - Q_p}{\tau} \quad (8)$$

Parametri k määritetään pumpun staattisia ominaisuuksia kuvaavasta ominaiskäyrästä, joka voidaan löytää esimerkiksi valmistajan kataloogista. Kyseinen parametri on siis puoliempiirinen vakio. Lisäksi termi τ kuvaa pumpun aikavakiota. [17]

4/3 -suuntaventtiili

Suuntaventtiilin perimmäinen tarkoitus on toimilaitteen liikesuuntien hallinta ja pysäyttäminen yhtä komponenttia käyttäen. Venttiileillä on tyypillisesti 2-4 eri kytkentäasentoa, joiden määrä vaihtelee venttiilin rakenteen mukaan. Kiinteän määrän asentoja omaavaa venttiiliä kutsutaan ON/OFF-venttiiliksi eli nämä venttiilit omaavat vain tietyt asennot. Tyypillisesti näitä venttiileitä käytetään tilavuusvirran suunnan ohjaukseen. Kytkentäasentojen välisiä asentoja voidaan toteuttaa servo- ja proportionaaliventtiileillä. Kyseiset venttiilit sallivat tilavuusvirran suunnan ohjauksen lisäksi portaattoman ohjauksen tilavuusvirran suuruudelle. Kuvassa 22 on esitetty erään 4/3-suuntaventtiilin rakennetta ja piirrosmerkki. [14, s. 236]



Kuva 22. 4/3-suuntaventtiili. [14, s. 237]

Venttiilin kytkentäasentojen ohjaamiseksi tarvitaan yhtälö kuvaamaan karan asemaa. Yhtälössä 9 on esitetty karan aseman differentiaaliyhtälö. [17]

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_{in} - U}{\tau} \quad (9)$$

Karalle syötetty ohjesignaali, jota karan tulisi noudattaa, kuvataan termillä U_{in} ja toteutunutta karan asemaa termillä U . Venttiilin reagointiaikaa kuvaa aikavakio τ . Suuntaventtiilin läpi virtaavan tilavuusvirran ratkaisemiseksi tulisi ensin määrittää venttiilin tilavuusvirtavakio C_v . Tämän ratkaiseminen onnistuu yhtälön 10 avulla. [17]

$$Q_{nom} = C_v \cdot U_{max} \sqrt{\Delta p} \quad (10)$$

Venttiilinvalmistajan katalogitiedoista saatavien suureiden avulla voidaan ratkaista tilavuusvirtavakio C_v . Yhtälössä 10 tilavuusvirta Q_{nom} kuvaa nominaalista tilavuusvirtaa paine-erolla Δp . U_{max} on jännitteen maksimiarvo. Venttiilin porteista A ja B läpi virtaavat tilavuusvirrat, Q_A ja Q_B , voidaan ratkaista yhtälöistä

$$Q_A = C_v \cdot U \cdot \text{sgn}(p_P - p_A) \cdot \sqrt{|p_P - p_A|} \quad , U > 0 \quad (11)$$

$$Q_B = -C_v \cdot U \cdot \text{sgn}(p_T - p_B) \cdot \sqrt{|p_T - p_B|} \quad , U > 0 \quad (12)$$

$$Q_A = C_{v_{\text{vuoto}_T}} \cdot \text{sgn}(p_A - p_T) \cdot \sqrt{|p_A - p_T|} + C_{v_{\text{vuoto}_P}} \cdot \text{sgn}(p_P - p_A) \cdot \sqrt{|p_P - p_A|} \quad , U = 0 \quad (13)$$

$$Q_B = -[C_{v_{\text{vuoto}_T}} \cdot \text{sgn}(p_B - p_T) \cdot \sqrt{|p_B - p_T|} + C_{v_{\text{vuoto}_P}} \cdot \text{sgn}(p_P - p_B) \cdot \sqrt{|p_P - p_B|}] \quad , U = 0 \quad (14)$$

$$Q_A = C_v \cdot U \cdot \text{sgn}(p_A - p_T) \cdot \sqrt{|p_A - p_T|} \quad , U < 0 \quad (15)$$

$$Q_B = -C_v \cdot U \cdot \text{sgn}(p_B - p_P) \cdot \sqrt{|p_B - p_P|} \quad , U < 0 \quad (16)$$

missä C_v on venttiilin tilavuusvirtavakio

U on jännite

p_P on syöttöpaine

p_T on tankin paine

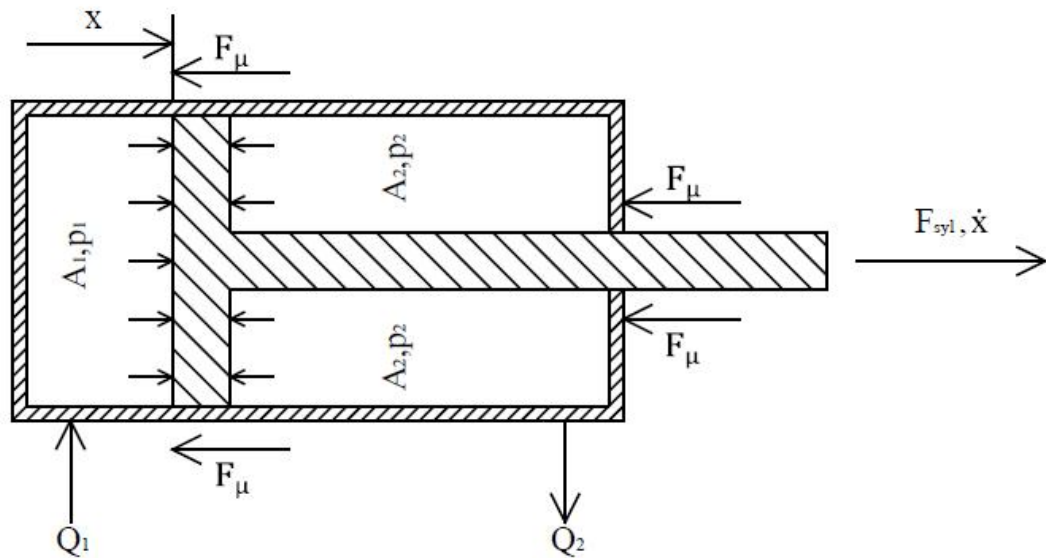
p_A ja p_B ovat lähtöporteissa vaikuttavat paineet

$C_{v_{\text{vuoto}_T}}$ on vuotovirtausvakio lähtöporteista tankin suuntaan

$C_{v_{\text{vuoto}_P}}$ on vuotovirtausvakio syöttöpaineportista lähtöporttien suuntaan.

Hydraulisyylinteri

Mekaniikan liikkeelle saamiseksi on hydraulipaine muutettava voimaksi. Tämä onnistuu esimerkiksi hydraulisyylinterien avulla. Sylinterin kammioissa vallitsevien paineiden sekä sylinterin ja männän pinta-alojen avulla voidaan muodostaa sylinterin tuottama teoreettinen voima. Sylinterin todellista voimaa määrittäessä tulee huomioida kitkavoimien vaikutus. Kuvassa 23 on esitetty hydraulisyylinterissä vaikuttavat voimakomponentit. [14, s. 195 & s. 201]



Kuva 23. Hydraulisyylinterissä vallitsevat voimat.

Yhtälössä 17 on esitetty hydraulisyylinterin tuottamaa voimaa kuvaava yhtälö.

$$F_{\text{syl}} = A_1 p_1 - A_2 p_2 - \sum F_{\mu} \quad (17)$$

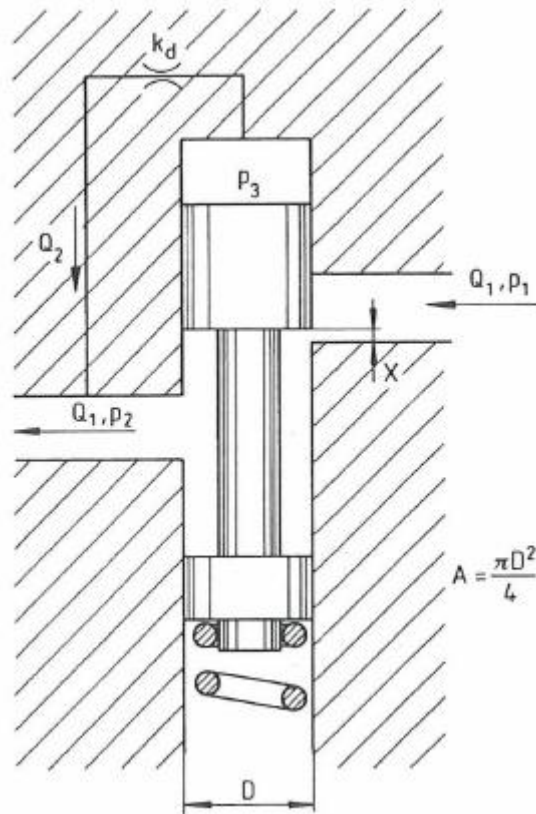
Kitkavoima on luonteeltaan monimutkainen ilmiö. Kitkavoimaan vaikuttaa männän liikenopeus, kammioiden paine-ero, tiivistetyyppi, männän liikesuunta sekä liike- ja seisonta-aika. Nämä tekijät vaikuttavat siihen, että kitkavoiman analyttinen malli on vaikea muodostaa. Tästä johtuu myös se, että kitkan kuvausta joudutaan idealisoimaan. Yhtälössä 18 on esitty eräs approksimaatio kitkavoimasta. [17]

$$F_{\mu} = \xi(\dot{x})(A_1 p_1 - A_2 p_2)(1 - \eta) \quad (18)$$

Sylinterin kitkavoiman approksimaatioon tarvitaan tiedot sylinterin kammioiden pinta-aloista A_1 ja A_2 , kammioissa vallitsevista paineista p_1 ja p_2 . Sekä tarvitaan tieto sylinterin männän liikenopeudesta $\xi(\dot{x})$ kullakin ajanhetkellä ja hyötysuhteesta η . [17]

Paineenalennusventtiili

Paineenalennusventtiiliä hyödynnetään hydraulijärjestelmässä, jossa järjestelmän jossakin osassa täytyy vallita muuta järjestelmää alhaisempi painetaso. Venttiilin jälkeinen paine eli toisiopaine pysyy vakiona vaikka venttiiliä edeltävä eli ensiöpaine vaihtelisi. Vaatimuksena tosin on, että ensiöpaine pysyy toisiopainetta korkeampana. Kuvassa 24 on esitetty paineenalennusventtiilin rakenne. [14, s. 268]



Kuva 24. Paineenalennusventtiilin rakenne. [18, s. 3]

Paineenalennusventtiilin läpi virtaava tilavuusvirta Q voidaan kuvata yhtälön 19 (alla) mukaisesti:

$$Q = \text{step5}(\Delta p) C_{V_{PAV,1}} \sqrt{\Delta p} \quad (19)$$

missä, step5 on kolmannen asteen jouhetusfunktio

$C_{V_{PAV_1}}$ on puoliempiirinen tilavuusvirtavakio paineenalennusventtiilille.

Jouheutsfunktion avulla helpotetaan simulointia, kun mahdollisia suunnan muutoksia virtauksessa tapahtuu. Jouheutusfunktion yleinen muoto on esitetty yhtälössä 20. [19]

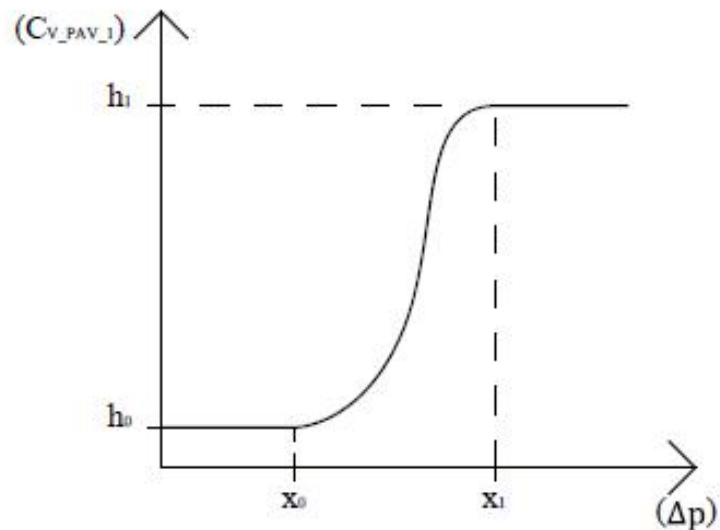
$$\text{step5} = \begin{cases} h_0 & : x \leq x_0 \\ h_0 + a\Delta^3[10 - 15\Delta + 6\Delta^2] & : x_0 < x < x_1 \\ h_1 & : x \geq x_1 \end{cases} \quad (20)$$

missä,

$$a = h_1 - h_0 \quad (21)$$

$$\Delta = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (22)$$

Kuvassa 25 on havainnollistettu jouhetusfunktion ideaa paineenalennusventtiilin tapauksessa sekä yhtälöissä 20-22 esiintyvien termien muodostumista on esitetty kuvassa 25. [19]



Kuva 25. Jouheutusfunktion periaate. [19]

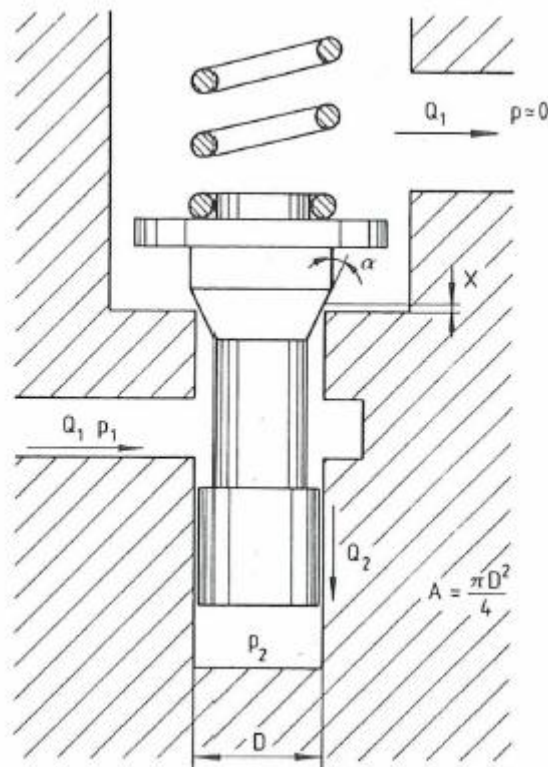
Paineenalennusventtiilin tilavuusvirran yhtälössä esiintyvä tilavuusvirtavakio $C_{V_{PAV_1}}$ voidaan ilmaista yhtälöllä:

$$C_{V_{PAV_1}} = \int \dot{C}_{V_{PAV_1}} = \frac{\text{step5}(\Delta p) - C_{V_{PAV_2}}}{\tau_{PAV}} \quad (23)$$

missä, $C_{V_{PAV_1}}$ kuvaa paineen alenemisesta muodostuvaa tilavuusvirtavakiota
 τ_{PAV} kuvaa paineenalennusventtiilin aikavakiota.

Paineenrajoitusventtiili

Paineenrajoitusventtiilin tehtävä hydraulijärjestelmässä on rajoittaa järjestelmässä vallitsevan paineen suuruus haluttuun arvoon. Komponentti siis suojaa järjestelmää vaurioilta, jotka mahdollinen paineen rajaton kasvu aiheuttaisi. Kuvassa 26 on esitetty erään paineenrajoitusventtiilin rakenne. [14, s. 259]



Kuva 26. Paineenrajoitusventtiilin rakenne. [18, s. 1]

Voimatasapainoyhtälö paineenrajoitusventtiilin karalle voidaan esittää yhtälön 24 avulla. Venttiilin rakenteista johtuvia termejä ovat karan massa m , vaimennusta kuvaa termi b , ja komponentissa olevan jousen jousivakiota termi k_m . [18, s. 1]

$$m \ddot{x} + b \dot{x} + k_m x = F_p - F_{f1} + F_{f2} - F_0, \quad x > 0 \quad (24)$$

Yhtälössä 24 esiintyvät voimakomponentit voidaan esittää yhtälöillä 25-26:

$$F_p = p_2 A - p_1 \pi D x \sin \alpha \cos \alpha \quad (25)$$

$$F_{f1} = 2 C d \cdot \pi D x \rho_1 \sin \alpha \cos \alpha \quad (26)$$

$$F_{f2} = 2 C d \cdot \pi D x \rho_1 \sin \alpha \quad (27)$$

missä, F_p on paineen tuottama voima
 F_{f1} on nesteen virtauksen aiheuttamat voimat
 F_{f2} on nesteen suihkuamisen aiheuttamat voimat
 F_0 on jousen esijännityksen aiheuttama voima
 Cd on purkautusmiskerroin.

Paineenrajoitusventtiilin läpi virtaava tilavuusvirta voidaan esittää yhtälön 28 avulla.

$$Q_1 = C d \cdot \pi D x \sin \alpha \sqrt{\frac{2 p_1}{\rho}} \quad (28)$$

$$= C V_{PRV} \sqrt{p_1}$$

Venttiilin vaimentimeen kulkeutuva tilavuusvirta voidaan esittää yhtälön 29 avulla.

$$Q_2 = C v_c (p_1 - p_2) = A x \quad (29)$$

Yhtälössä 29 termi $C v_c$ kuvastaa laminaarisen vaimennuksen tilavuusvirtavakiota. Puoliempiirisesti ilmaistuna voidaan yhtälöt 24...28 ilmaista muodossa:

$$\begin{cases} \ddot{C} V_{PRV} + 2 C_3 C_4 \dot{C} V_{PRV} + (C_1 + C_2 p_1) C_3^2 C V_{PRV} = C_3^2 (p_1 - p_{ref}) \quad , C V_{PRV} \geq 0 \\ Q_1 = C V_{PRV} \sqrt{p_1} \end{cases} \quad (30)$$

missä,

$$C_1 = \frac{k_m}{ACd\pi D \sin\alpha \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \quad (31)$$

$$C_2 = \frac{2Cd - (2Cd + 1)\cos\alpha}{ACd \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \quad (32)$$

$$C_3 = \sqrt{\frac{ACd\pi D \sin\alpha \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{m}} \quad (33)$$

$$C_4 = \frac{A^2}{2C_v c m C_3} \quad (34)$$

Termit $C_1 \dots C_4$ ovat puoliempiirisiä vakioita. Tarkastelemalla yhtälöryhmää 30 ja olettamalla karan hitautta kuvaavan termin \dot{K} nolaksi voidaan yhtälöryhmä kuvata yhtälön 35 mukaisesti. [18, s. 2]

$$\begin{cases} Q_1 = C_{V_{PRV}} \sqrt{p_1} \\ C_{V_{PRV}} = \int \dot{C}_{V_{PRV}} = \int_0^t \frac{p_1 - p_{ref} - (C_1 + C_2 p_1) C_{V_{PRV}}}{C_{dyn}} dt \end{cases} \quad (35)$$

Yhtälössä YY esiintyvät puoliempiiriset vakiot C_1 ja C_2 voidaan ratkaista yhtälön 36 avulla, joka kuvaa jatkuvuustilassa olevan venttiilin tilavuusvirtaa. Venttiilin ollessa jatkuvuustilassa on tehty oletus, että termi \dot{K} on nolla. [18, s. 3]

$$Q_1 = \frac{p_1 - p_{ref}}{\frac{C_1}{\sqrt{p_1}} + C_2 \sqrt{p_1}}, \quad p_1 \geq p_2 \quad (36)$$

Yhtälön 36 ratkaisemiseksi tarvitaan venttiilin valmistajan paine-tilavuusvirtakäyrä, jolta voidaan määrittää kaksi pistettä parametrien C_1 ja C_2 ratkaisemiseksi. Yhtälössä 35 termi C_{dyn} kuvaa venttiilin dynaamista käyttäytymistä. Tämä termi on saatavissa venttiilin dynaamisista vastemittauksista.

Tilavuus

Tilavuuksien roolit puoliempiirisessä mallinnustavassa ovat merkittävät. Kuten jo edellä esitetyistä kaavoista voidaan huomata, että komponentit määrittävät tilavuusvirrat komponenttien välillä. Hyödyntämällä paineen differentiaaliyhtälöä, joka on esitetty yhtälössä 37, voidaan määrittää komponenttien välillä vallitsevat paineet. [17]

$$p = \frac{Be}{V} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (37)$$

Yhtälössä 37 termi Be kuvaa tehollista puristuskerrointa ja termi V tilavuutta. Q_{in} kuvaa tilavuuteen virtaavaa tilavuusvirtaa ja Q_{out} siitä lähtevää tilavuusvirtaa. Kyseisestä yhtälöstä voidaan ratkaista integroimalla komponenttien välillä vallitseva paine p . [17]

Vastusvastaventiili

Vastusvastaventiili on vastaventiilillä varustettu vastusventtiili [14, s. 310]. Kyseisen komponentin tarkoituksena on kuristaa venttiilin läpi virtaavaa tilavuusvirtaa toiseen suuntaan, mutta vastakkaiseen suuntaan virtaus pääsee vapaasti läpi [14, s. 311]. Kyseisen komponentin tarkoitus on ohjata toimilaitteen nopeuksia ja tyypillinen sijoituspaikka on esimerkiksi sylinterin + - ja/tai - -kammion linja(t) [14, s.311]. Vastusvastaventiilin läpi virtaavaa tilavuusvirtaa voidaan kuvata kahdella kuristimella ja asettamalla ehdot virtaussuunnan mukaisesti yhtälöllä:

$$Q_{VV} = \begin{cases} C_{VV_1} \cdot \text{sgn}(\Delta p) \sqrt{|\Delta p|} + C_{VV_2} \cdot \sqrt{|\Delta p|}, & \dot{x} \geq 0 \\ C_{VV_1} \cdot \text{sgn}(\Delta p) \sqrt{|\Delta p|}, & \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (38)$$

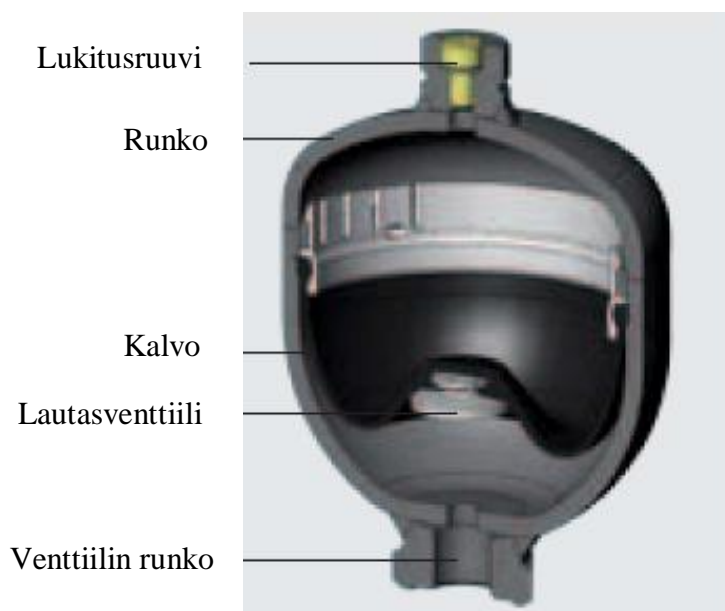
missä, C_{VV_1} on molempiin suuntiin toimivan kuristimen tilavuusvirtavakio
 C_{VV_2} on yhteen suuntaan toimivan kuristimen tilavuusvirtavakio
 \dot{x} on toimilaitteen liikenoisuus.

Olettaen, että toimilaitteen liikkeen ollessa positiivinen niin tällöin virtaus pääsee kulkemaan molempien kuristimien läpi eli vastaventiilin ja vastusventtiilin läpi. Vastaavasti liikkeen ollessa negatiivinen virtaus kulkee kuristimen läpi, joka kuristaa virtausta molempiin suuntiin eli vastusventtiilin kautta. On huomiotava kuitenkin linja(t), johon vastusvastaventiili kytketään sekä venttiilin asento linjassa muodostettaessa puoliempiiristä kuvausta. Yhtälössä 38 esitetty kuvaus on sylinterin

+kammion linjalle ja rajoittaa männän paluuliikkeen nopeutta. [17]

Paineakku

Hydraulijärjestelmän tuottamaa energiaa voidaan varastoida paineakkujen avulla. Paineakun talteenottamaa energiaa voidaan hyödyntää myöhemmin jolloin paineakku toimii energialähteenä hydraulijärjestelmälle tai sen osalle. Rakenteiltaan paineakkuja on kolmea eri tyyppiä: rakollinen, kalvollinen ja männällinen. Kuvassa 27 on esitetty erään kalvollisen paineakun rakenne. [14, s. 212]



Kuva 27. Kalvollisen paineakun rakenne [20, s. 55, muokattu]

Tarkasteltaessa kuvaa 27 voidaan havaita kuinka neste- ja kaasutila on paineakussa erotettu toisistaan. Paineakku talteenottaa energiaa johtamalla hydraulijärjestelmästä paineistettua nestettä akun nestetilaan, joka puolestaan puristaa kokoon kaasutilaa. Eli nestetilassa vallitseva paine on suurempi kuin kaasutilan esitäyttöpaine. Hydraulijärjestelmän paineen laskiessa alle paineakun kaasutilan paineen purkautuu akkuun varastoitu nestemäärä takaisin järjestelmään. Edellä kuvattu toimintaperiaate kuvaa myös männällistä ja rakollista paineakkua. [14, s. 213]

Hydraulijärjestelmässä paine todennäköisesti vaihtelee työkierron aikana ja näin ollen myös paineakun nestetila vaihtelee. Tilavuusvirta, Q_{accu} , sisään ja ulos paineakusta voidaan esittää yhtälön 39 avulla. [17]

$$Q_{\text{accu}} = C_d \cdot A_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (|p_{\text{in}} - p_{\text{gas}}|) \text{sgn}(p_{\text{in}} - p_{\text{gas}})} \quad (39)$$

Yhtälössä 39 paineakun nestetilan painetta kuvaa termi p_{in} ja vastaavasti kaasutilan painetta termi p_{gas} . Termi C_d kuvaa paineakun kuristimen purkautumiskerrointa ja termi A_v tämän kuristimen aukon pinta-alaa. Paineakun tilavuusvirta voidaan esittää puoliempiirissä muodossa, joka on esitetty yhtälössä 40. [17]

$$Q_{\text{accu}} = C_{V_{\text{accu}}} \sqrt{(|p_{\text{in}} - p_{\text{gas}}|) \text{sgn}(p_{\text{in}} - p_{\text{gas}})} \quad (40)$$

$C_{V_{\text{accu}}}$ kuvaa puoliempiiristä tilavuusvirtavakiota paineakulle, joka voidaan huomata yhtälöstä 40. Tämä puoliempiirinen termi voidaan määrittää yhtälön 41 avulla hyödyntäen paineakun valmistajan tarjoamia teknisiä tietoja.

$$C_{V_{\text{accu}}} = \frac{Q_{\text{accu}}}{\sqrt{(|\Delta p|)}} \quad (41)$$

Yhtälössä 41 termi Δp kuvaa paine-eroa paineakun nestetilan ja kaasutilan välillä. Kaasutilan paineen määrittämiseksi on ensimmäiseksi määriteltävä kuinka paljon nestettä akussa virtaa. Yhtälön 42 avulla nesteen määrä voidaan selvittää.

$$V_{\text{oil}} = \int_0^t Q_{\text{accu}} dt + V_{\text{oil0}} \quad (42)$$

Paineakussa voi olla alussa pieni alkutilavuus V_{oil0} , joka tosin riippuu paineakun rakenteesta. Öljyn määrä V_{oil} paineakussa saadaan yhtälön 42 avulla, kun integroidaan paineakun tilavuusvirta Q_{accu} ajan suhteen ja lisätään alkutilavuudessa oleva öljymäärä. Tarvittavan öljyn määrän selvitettyä voidaan määrittää kaasun tilavuus yhtälön 43 avulla. [14, s. 220]

$$V_{\text{gas}} = V_{\text{max}} - V_{\text{oil}} \quad (43)$$

Määriteltäessä paineakun kaasutilan tilavuutta V_{gas} yhtälön 43 avulla tulee tietää paineakun kokonaistilavuus V_{max} . Kuten yhtälöstä 43 voidaan huomata, että kaasutilan tilavuus on kokonaistilavuuden ja öljytilavuuden erotus. Kaasutilan paine voidaan määrittää energiatasapainoyhtälöllä 44, joka pätee ideaalikaasulle. [14, s. 221]

$$p V^\kappa = \text{vakio} \quad (44)$$

Yhtälön 44 kuvaama prosessi on kaasuille tyypillinen isoterminen prosessi, jossa p kuvaa painetta, V tilavuutta ja κ adibaattivakiota. Tätä yhtälöä muokkaamalla voidaan määrittää paineakulle eri tilanteissa vastaava yhtäläisyys. Yhtälössä 45 on esitetty paineakun energiatasapainoyhtälö. [14, s. 221]

$$p_{\text{gas}} V_{\text{gas}}^\kappa = p_{\text{gas}0} V_{\text{gas}0}^\kappa \quad (45)$$

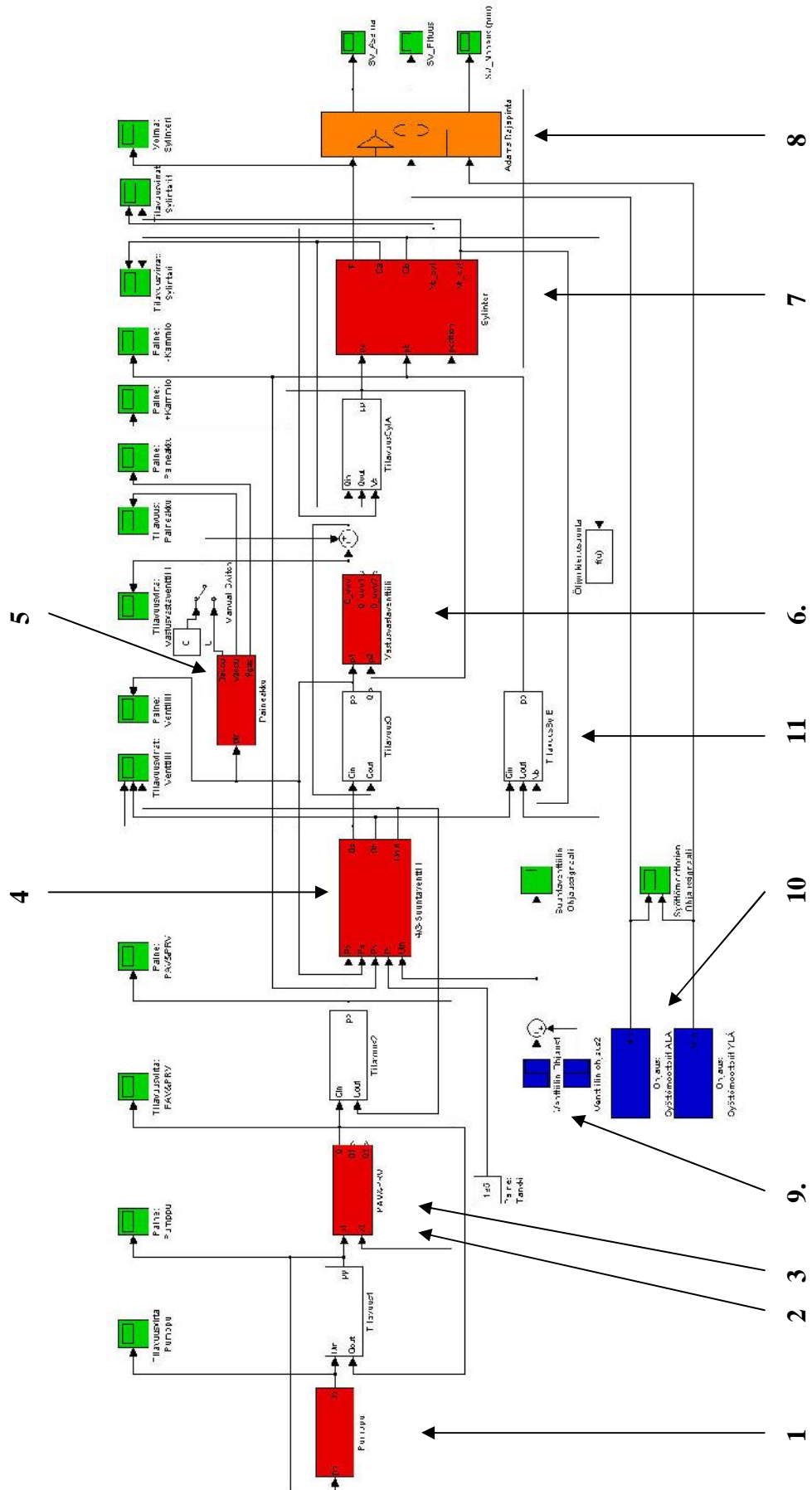
Paineakun kaasutilan paine p_{gas} voidaan nyt ratkaista energiatasapainoyhtälöstä, joka on paineakulle esitetty edellä.

$$p_{\text{gas}} = p_{\text{gas}0} \frac{V_{\text{gas}0}^\kappa}{V_{\text{gas}}^\kappa} \quad (46)$$

Kaasutilan paineen ratkaisuun tulee tietää paineakun esitäyttöpaine $p_{\text{gas}0}$ ja vastaava alkutilavuus $V_{\text{gas}0}$ kyseisellä esitäyttöpaineella. Lisäksi hyödynnetään aiemmin ratkaistua kaasutilavuutta V_{gas} . Yhtälössä 46 oleva eksponentti κ on riippuvainen tilanmuutoksesta. Esimerkiksi adiabaattiselle eksponentin arvo on 1.4.

4.3.3 Pituusmittalaitteen hydraulipiiri

Puoliempiiristä ajattelutapaa noudattaen on luotu virtuaalimallin pituusmittalaitteen hydrauliliikkapiiri. Eli piiri koostuu komponenteista ja tilavuuksista. Kuvassa 28 on esitetty MATLAB 2009b -ohjelmiston Simulink -ominaisuudella luotu hydrauliliikkapiiri.



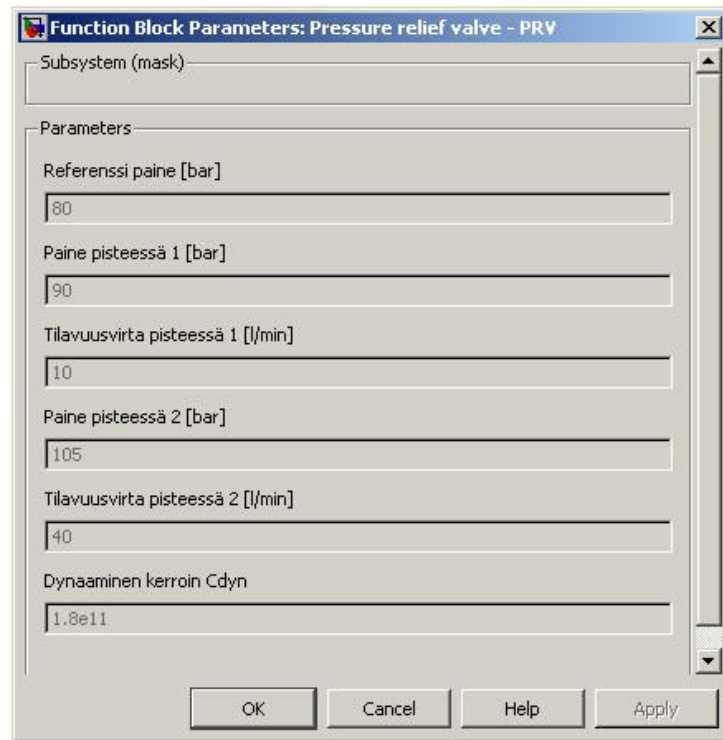
Kuva 28. Virtuaalimallin hydraulikkapiiri rajapintoiheen.

Hydrauliikkakomponentteja kuvaavat punaiset komponentit ja tilavuuksia valkeat komponentit, jotka voidaan havaita kuvasta 28. Näiden lisäksi voidaan erottaa rajapinta, joka kuvaa hydrauliikkapiirin ja mekaniikkamallin välistä informaation välitystä. Tätä rajapintaa kuvataan oranssilla komponentilla. Taulukossa 4 on tarkennettu, mitä kukin komponentti tarkoittaa kuvassa 28.

Taulukko 4. Hydrauliikkapiirin komponentit.

Komponentti	Selvennys
1	Pumppu
2	Paineenalennusventtiili
3	Paineenrajoitusventtiili
4	4/3-suuntaventtiili
5	Paineakku
6	Vastusvastaventtiili
7	Sylinteri
8	Hydrauliikan ja mekaniikan rajapinta
9	Venttiilin ohjaus
10	Syöttömoottorien ohjaus
11	Tilavuus

Kuvasta 28 ja taulukosta 4 voidaan havaita, myös ohjaus suuntaventtiilille ja syöttömoottoreille sisältyy jo hydrauliikkapiiriin yhteyteen. Kuvassa nämä on havainnollistettu sinisillä komponenteilla. Virtuaalimallin muuttujien käytöstä tarkkaillaan vihreillä komponenteilla, jotka tulostavat muuttujien arvot kullakin ajanhetkellä. Hydrauliikkapiirin komponenttien parametrien varioimiseksi luodaan jokaisen komponentin yhteyteen valikko, johon voidaan valita valmistajan tarjoamien tietojen perusteella sopivat parametrit ja varioida näitä tarpeen tullen. Kuvassa 29 on havainnollistettu paineenrajoitusventtiilin parametrivalikko.



Kuva 29. Paineenrajoitusventtiilin parametrivalikko.

Luodut valikot on spesifioitu juuri kyseiselle komponentille ja sisältävät tietyt parametrit, joita voidaan varioida. Kuvasta 29 voidaan huomata, että paineenrajoitusventtiilin varioitavia parametreja ovat esimerkiksi referenssipaine, paineet eri pisteissä ja tilavuusvirrat. Edellä mainitut parametrit voidaan löytää esimerkiksi komponenttivalmistajan katalogista.

4.4 Verifiointimittaukset

Virtuaalimallista saatavien tuloksien verifiointimista varten suoritetaan H414 harvesteripään modifioidulle pituusmittalaitteen hydraulikkapiirille mittaukset, sillä aiempaa mittausdataa ei ole hyödynnettävissä. Mittauksia suunniteltaessa on tarkoitus hakea mahdollisimman paljon mittausdataa kerralla, sillä mittauskerrat ovat rajallisia ja resurssien käyttö on tarkasti suunniteltua. Pituusmittalaitteen hydraulikkapiiriin on lisätty paineakku, jota tyypillisesti ei ole ko. piirissä. Tällä lisäyksellä on tarkoitus tutkia paineakun vaikutusta pituusmittalaitteen hydraulikkapiirin käytökseen erityisesti erikoistapauksien kaltaisissa tilanteissa.

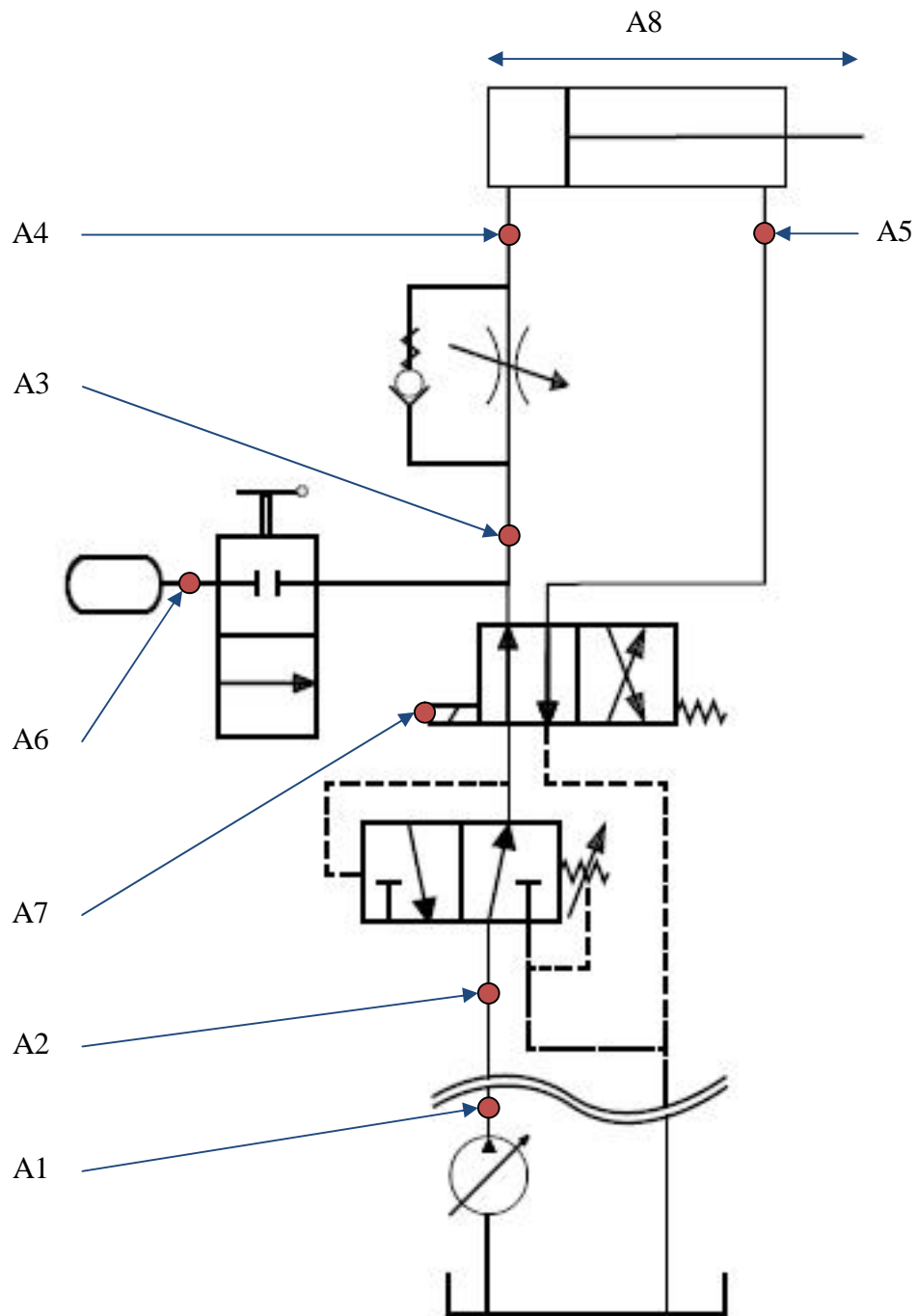
Hydraulikkapiirille suoritetaan instrumentointi, jotta piirin käytöstä voidaan tarkkailla.

Instrumentoinnin yhteydessä vaihdetaan pituusmittalaitteen suuntaventtiili uudemman sukupolven venttiiliin, jonka spesifikaatioita hyödynnetään kyseistä komponenttia mallinnettaessa. Lisäksi sylinterin pituutta mittaava konstruktio asennetaan paikalleen. Instrumentoinnin päätteeksi yhdistetään harvesteripää peruskoneeseen, joka tässä tapauksessa on John Deeren 1270D-mallin peruskone sekä yhdistetään anturit mittalaitteistoon peruskoneen puomiston datakaapeleita hyödyntäen.

Seuraavissa kappaleissa on esitelty tarkemmin piirin instrumentointikohteet ja toteutetut mittausjärjestelyt.

4.4.1 Mittauskohteet

Pituusmittalaitteen hydraulipiirissä on useita komponentteja eli useita mittauskohteita. Kyseinen piiri on esitelty aiemmin tässä työssä kappaleessa 4.3. Tarkoituksena on tarkkailla piiriä mahdollisimman monesta kohtaa mittausten aikana sillä virtuaalimallissa tämä on oikeaa mallia paljon helpompaa. Kuvassa 30 on esitetty pituusmittalaitteen hydraulipiirin mittauskohteet.



Kuva 30. Paineanturien sijainnit hydraulikkapiirissä mittausten aikana.

Pituusmittalaitteen hydraulipiiriä tarkkaillaan paineantureilla. Anturien sijoittelua määräsi anturien lukumäärä ja näin ollen 3-tiepaineenalennusventtiilin ja suuntaventtiilin väliin ei anturia riittänyt. Mittauksissa käytettävät paineanturit ovat KELLER AG für Druckmesstechnik:n valmistamia piezoresistiivisiä paineantureita [21]. Kyseiset anturit soveltuvat mittauksia varten mainiosti sillä lämpötilan vaikutus

anturin mittaustarkkuuteen on erittäin pieni [21]. Mittaukset on suoritettu kevättalvella, jolloin lämpötila vaihtelee nollan molemmin puolin vuorokauden aikana. Sylinterin pituuden tarkkailua varten on suunniteltu ja valmistettu oma konstruktio. Kyseinen tarkastelukohde on haastava anturoitava pituutta/asemaa mittaavilla kaupallisilla antureilla huomioitaessa harvesteripään työsyklit ja työympäristö. Suunniteltu ja valmistettu konstruktio mittaa pituusmittalaitteen varren kulmamuutosta. Tässä on hyödynnetty ASM POSIROT PRAS2 absoluuttianturia sekä kiertymää ilmaisevasta magneetista PRMAG20 Ø30 [22]. Anturin mitta-alue on kattava eikä magneetin ja anturin välillä tarvitse olla kosketusta [22]. Anturin sijoittaminen mittavarten vaatii osien modifikaatiota ja korvaavien osien valmistusta. Kyseinen konstruktio osineen on esitetty liitteessä I. Taulukossa 5 on eritelty tarkemmin instrumentointikohteet.

Taulukko 5. Anturien mittaushkohteet hydraulipiirissä.

Anturi	Mittaushkohte
A1	Harvesteripään pääpaine
A2	Pituusmittalaitteen pääpaine
A3	Paine ennen vastusvastaventtiiliä
A4	Paine sylinterin + -kammiossa
A5	Paine sylinterin - -kammiossa
A6	Paineakun paine
A7	Pituusmittalaitteen venttiilin ohjaussignaali
A8	Sylinterin männän asema

Mittauksista saatava data ei rajoitu ainoastaan edellä esitettyihin anturien tietoihin. Harvesteripää kerää tietoa myös puun pituudesta, halkaisijasta sekä monesta muusta muuttujasta. Olennaisimmat tiedot ovat puun pituus ja halkaisija, jonka mukaan puun lopullinen käyttötarkoitus määritellään.

Anturien välittämää tietoa täytyy tallentaa työsykliä aikana ja mahdollisesti tarkastella työkiertojen välissä eli mittalaitteiston on oltava mukana harvesterin hytissä. Työssä suoritetuissa mittauksissa on käytetty SoMat eDAQLite -mittalaitteistoa sekä SoMat

TCE –ohjelmistoa [23]. Taulukossa 6 on esitetty mittauksissa hyödynnetty kokoonpano komponentteineen.

Taulukko 6. Mittalaitteiston kokoonpanon osat.

Kokoonpano	Komponentti	Määrä
eDAQLite		1
	ELCPU	1
	ELHLS	4
	ELDIO	1
	Smart Module (CAN)	1

ELCPU on mittalaitteiston pääprosessori (central processing unit), joka käsittelee dataa mittauksien aikana. Kyseinen komponentti pystyy käsittelemään suurenkin määrän dataa kerralla sekä eri tyyppisiä datamuotoja. Lisäksi datan hallinta ja analysointi on vaivatonta. ELHLS:t ovat analogisia layeriteitä, joiden avulla tarkkaillaan antureiden lähettämää analogista signaalia. Kyseiset layerit välittävät signaalin pääprosessorille prosessoitavaksi. ELDIO:t vastaavat ELHLS:siä, mutta käsittelevät digitaalisia tulo- ja lähtösuuresignaaleja. Smart Module on eräänlainen muunnin, joka muuntaa CAN-väylältä tulleen mitatun signaalin kompaktimpaan muotoon pääprosessoria varten. eDAQLite on kompaktimpi versio ja tiedoston käsittely rajatumpi kuin eDAQ:ssa, joten Smart Modulen avulla saadaan signaali muunnettua ja pakattua eDAQLitien prosessoria varten. [24]

4.4.2 Mittausjärjestelyt

Mittauksissa tarkkaillaan hydraulipiirin käyttäytymistä, kun niin sanottua mittapyörän painatuspainetta varioidaan. Lisäksi hyödynnetään tilaisuutta ja tarkastellaan myös paineakun vaikutusta piirin käyttäytymiseen. Ennen mittauksien aloittamista on päätettävä vastusvastaventiilin avauman suuruus. Lisäksi on kalibroitava harvesteripään mittatarkkuus kullekin puulajille. Taulukossa 7 on esitetty suunnitelma mittausjärjestelyistä.

Taulukko 7. Suunnitelma mittausjärjestelyistä.

Tapaus / Asetuspaine	Vastusvasta- venttiilin asento	Paineakku Off	Paineakku On	Erikoistapaus 1 & Paineakku Off	Erikoistapaus 2 & Paineakku On
40 bar		x			
60 bar	x	x		x	
70 bar		x	x	x	x
80 bar		x	x		x

Mittaukset aloitetaan määrittämällä vastusvastaventtiilin avauman suuruus, jonka suuruuden määrittäminen suoritetaan taulukon 7 mukaisesti yhdellä painatuspaineella. Vastusvastaventtiilillä on taipumus vaikuttaa puun pituusmitan tarkkuuteen. Suotuisan parametrin löytyessä voidaan suorittaa loput mittaukset kyseisen avauman suuruudella. Eri mittapyörän painatuspaineet on esitetty taulukossa 7 ja kullakin painatuspaineella käydään läpi noin 10 työkiertoa eli noin 10 runkoa, jotka karsitaan ja sahataan määrämittaen. Piiriin on mielenkiinnon vuoksi lisätty paineakku ja sen toimintaa sekä vaikutusta piiriin tarkkaillaan myös mittauksissa. Paineakulla tarkkaillaan vain kahta painealuetta johtuen paineakun esitäyttöpaineesta.

Taulukossa 7 esitetyillä erikoistapauksilla tarkotetaan työkiertoja, joissa harvesteripään työskentelyä autetaan liikuttamalla puomia. Kuvassa 31 on havainnollistettu kyseiset työkierrat. Virtuaalimallissa ei voida huomioida puomin liikettä, koska simulointi rajoittuu harvesteripäähän ja sen liikkeisiin.



Kuva 31. Erikoistapauksien työkierrot.

Kuvassa 31 esitetyt tavat hyödyntää puomia harvesteripään työskentelyssä, eivätkä ne ole kovin yleisiä, mutta aika-ajoin näitä joudutaan käyttämään. Käännöllä tai taitolla avustetaan harvesteripäätä, kun läpimitta on hyvin suuri tai puu on kaatunut hankalaan paikkaan. Käännöllä ja taitolla seuraaminen eroaa toisistaan, joka voidaan huomata kuvasta 31. Punainen nuoli kuvassa 31 kuvaa käännöllä seuranta ja sininen taitolla seuranta. Käännöllä seuraten pyörii puomisto peruskoneeseen nähden, kun taas taitolla seuraten pylvään ja taittopuomin välinen kulma muuttuu.

4.5 Ohjausjärjestelmä

Harvesteripäätä ohjataan harvesterin hytistä ja ohjaisignaalit välittyvät harvesterin hytistä puomin datakaapeleita pitkin harvesteripään ohjausyksikköön, HHM:lle (Harvester Head Module). Ohjausyksikkö käsittelee kuljettajan antamat käskyt ja näin ollen myös ohjaa kouran toimintoja. Pituusmittalaitteen ohjaukseen liittyy karsimateria-

ja alasyöttömoottorien sylinterien ohjaus. Pituusmittalaitetta liikuttaa sylinteri, jota ohjaa venttiili. Venttiilille välittyvä signaali kääntää venttiilin asennon ja näin ollen sylinteri joko vetäytyy sisään tai työntyy ulos. Pituusmittalaitteen työntyminen ulos vaatii sen, että karsimaterät ja alasyöttömoottorien rullat ovat puristuneet puuta vasten ja karsimaterät välittävät puun halkaisijatiedon. Tässä työssä ohjataan ainoastaan pituusmittalaitteen venttiiliä ja näin ollen pituusmittalaitteen asentoa, karsimaterien ja alasyöttömoottorien sylinterien tuottamaa puristusta ei ohjata yhdessä. Karsimaterien ja alasyöttömoottorien sylinterien tuottamat puristukset on luotu MSC Adams 2010 -ohjelmistolla asettamalla sylinterien paikalle voimakomponentit.

Simulointimallissa olevassa ohjausjärjestelmässä välitetään signaalit pituusmittalaitteen suuntaventtiilille sekä harvesteripään syöttömoottorien rullille, jotka liikuttavat puuta kouraan nähden. Ohjausjärjestelmä on luotu MATLAB 2009b -ohjelmiston Simulink -ominaisuudella. Signaalit ovat toteutettu yksinkertaisilla askelfunktioilla.

5 SAAVUTETUT TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO

Tässä luvussa käydään läpi tulokset työssä asetettujen tavoitteiden mukaisessa järjestyksessä. Yhden painealueen tulokset on esitetty tekstissä sekä kuvina että taulukoina ja muiden painealueiden tulokset löytyvät liiteistä III-VII. Lisäksi liitteessä VIII on esitetty yhden painealueen mitattuja tuloksia. Tulokset ja niiden analysointi on jaettu erillisiin alaotsikoihin.

5.1 Virtuaalimallin verifointi

Mitattuja tuloksia ja virtuaalimallista saatuja tuloksia verrattiin keskenään. Mittauksissa suoritettiin harvesteripäällä työkierto, jossa puuta ei prosessoitu. Tätä työkiertoa käytetään apuna virtuaalimallin hydraulikkakomponenttien verifioinnissa. Taulukossa 8 on esitetty pituusmittalaitteen työkierto, jota toistettiin pari kertaa.

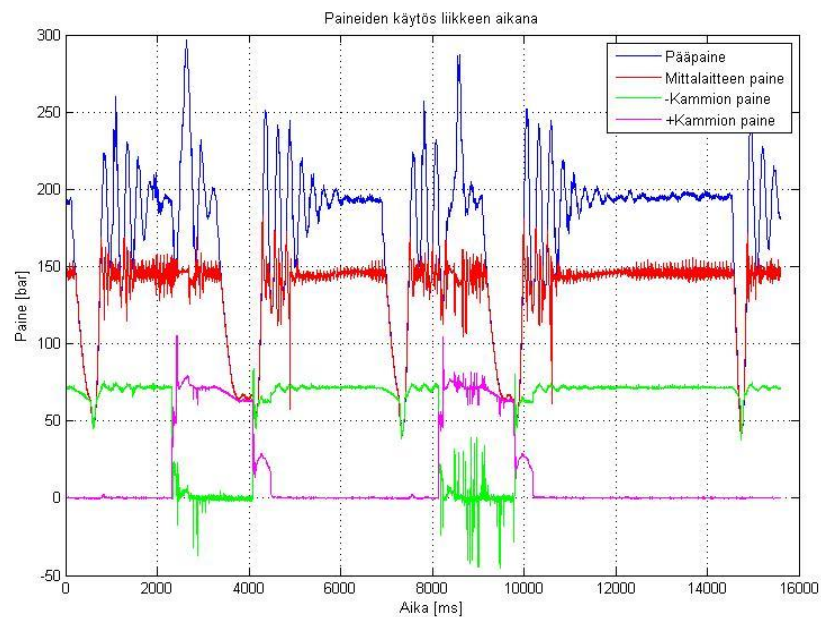
Taulukko 8. Työkierto verifointia varten.

Ajanhetki	Sylinterin pituus
t_0	L_0
t_1	L_1
t_2	L_1
t_3	L_0

Taulukkoa 8 tarkastelemalla voidaan huomata, että pituusmittalaitteen sylinteriä ajettiin siis sisään ja ulos. Pituusmittalaitteen hydraulisyylinterin liike on yhdistetty harvesteripään etu-, takaterien ja alasyöttömoottorien runkojen aukeamiseen ja sulkeutumiseen. Näiden vaikutus heijastuu pituusmittalaitteen hydraulikkapiirin mittaustuloksiin. Hyödyntämällä mittauksista saatuja tuloksia voidaan säätää parametreja kohdalleen ja suorittaa virtuaalimallin verifointi. Seuraavassa on suoritettu vertailu mitattujen ja virtuaalimallista saatujen tulosten välillä. Virtuaalimallin verifointi on suoritettu 70 bar:n paineella.

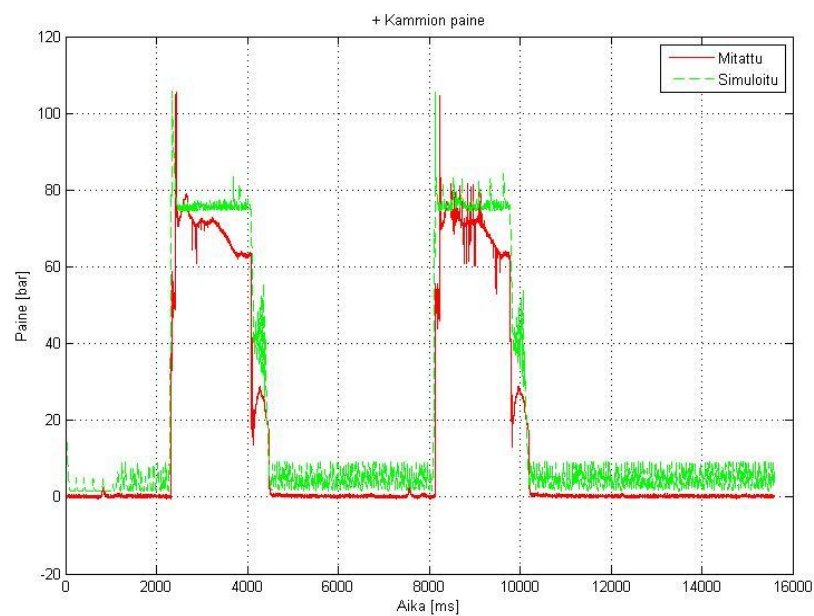
Taulukon 8 mukaisen pituusmittalaitteen sylinterin työkierron aikana harvesteripään

paineiden käyttö on havainnollistettu kuvassa 32. Kyseiset paineet on mitattu.



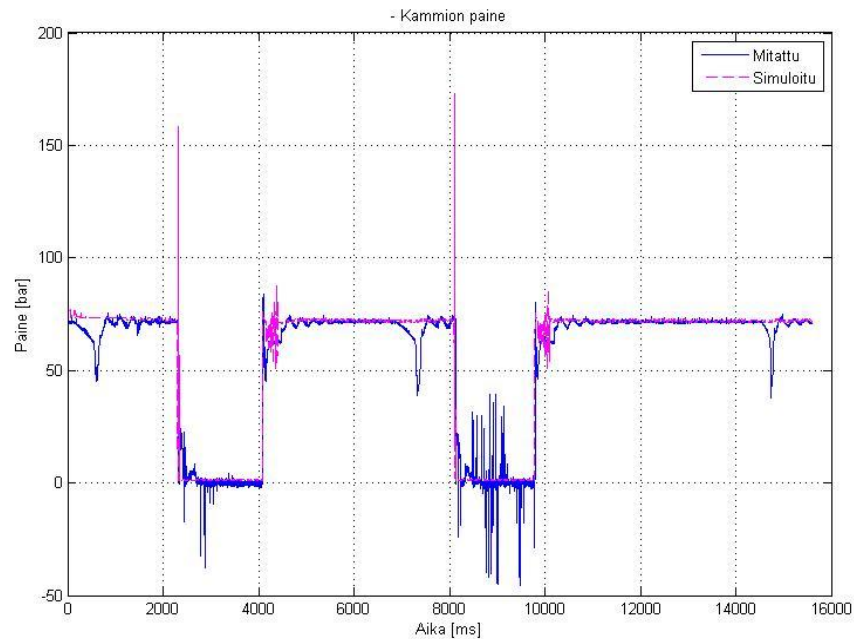
Kuva 32. Harvesteripään mitatut painekäyrät.

Kuvassa 32 esitetyt käyrät havainnollistavat harvesteripään pääpaineen, pituusmittalaitteen lohkolle tulevan paineen ja pituusmittalaitteen sylinterin kammioiden paineiden käytöstä. Kuvassa 33 on esitetty virtuaalimallin sylinterin +kammion paine ja vastaava mitattu paine.



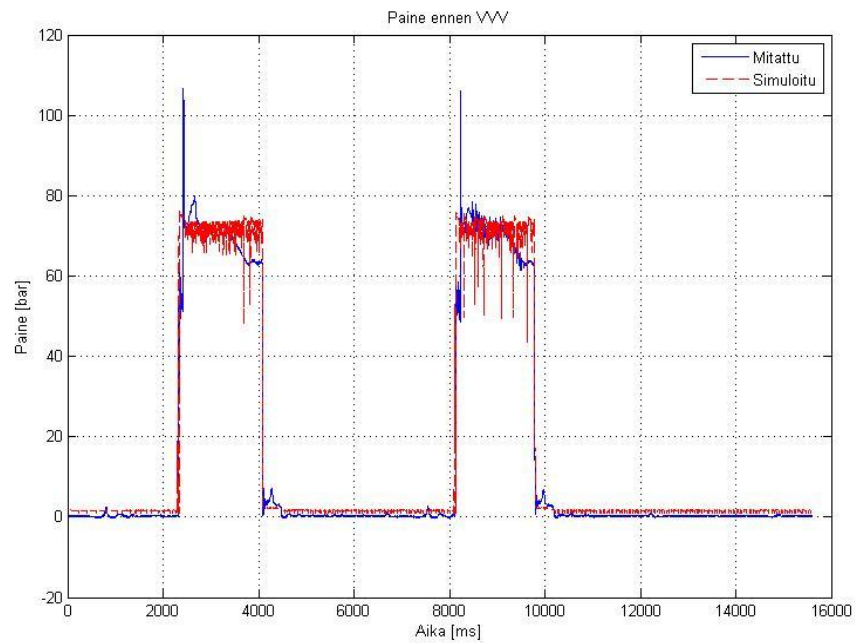
Kuva 33. +Kammion paine työkierron aikana.

Kuvan 33 mitattua käyrää tarkastellessa voidaan huomata, että paine ei pysytele halutulla tasolla 70 bar:ssa. Tälle syy voidaan huomata kuvasta 32, josta nähdään harvesteripään pääpaineen romahtaminen. Kuvassa 34 on esitetty virtuaalimallin -kammion paine ja vastaava mitattu paine.



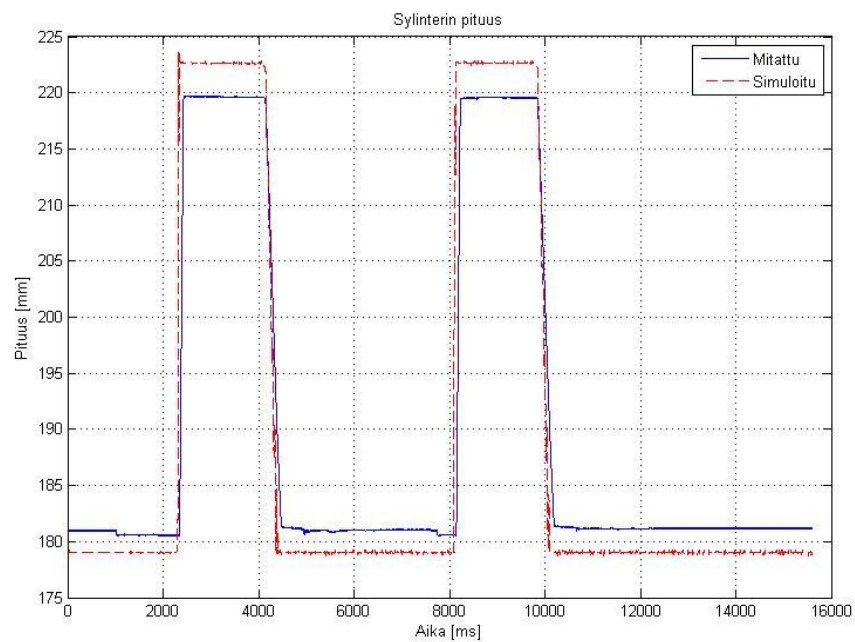
Kuva 34. -Kammion paine työkierron aikana.

Harvesteripään pääpaineen romahtaminen voidaan myös havaita tarkastelemalla sylinterin -kammion mitattua painetta. Lisäksi tarkastelemalla kuvia 33 ja 34 huomataan, että mitatut paineet sisältävät häiriötä. Vastusvastaventiiliä edeltävä paine on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Vastusvastaventtiiliä edeltävä paine.

Vastusvastaventtiili sijaitsee suuntaventtiilin ja sylinterin välissä hydraulikkakaavion mukaisesti, joka on esitetty kuvassa 20. Eroja on havaittavissa virtuaalimallin simuloitun ja mitatun paineen välillä. Harvesteripään sylinterin nivelpisteiden välistä etäisyyttä on havainnollistettu kuvassa 36.

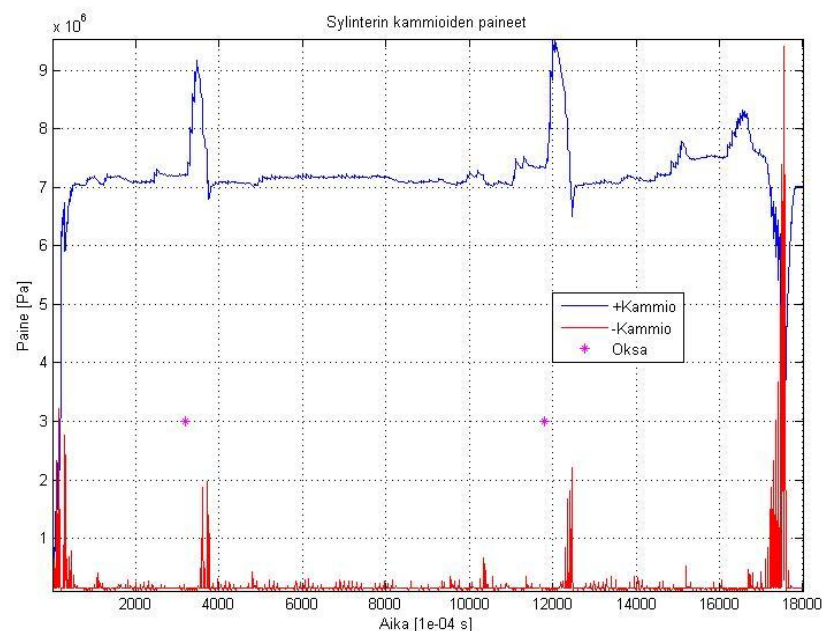


Kuva 36. Sylinterin pituus työkierron aikana.

Taulukossa 8 esitetty työkierto ilmenee tarkasteltaessa sylinterin pituuden kuvaajaa. Kuvaa 36 tarkastelmalla havaitaan pienet erot sylinterin pituudessa sylinterin liikuessa ääriasennosta toiseen. Verifionnin yhteydessä korjailtiin hydraulikkakomponenttien parametreja, jotta komponenttien käytökset vastaisivat suurinpiirtein toisiaan. Hydraulikkakomponenttien parametrit on esitetty liitteen II taulukossa II.1. Paineenalennusventtiilin, paineenrajoitusventtiilin, suuntaventtiilin, paineakun ja vastusvastaventtiilin parametrien määrittämisessä on hyödynnetty valmistajien katalogeja [25],[26],[27],[20].

5.2 Virtuaalimalli ja puun prosessointi

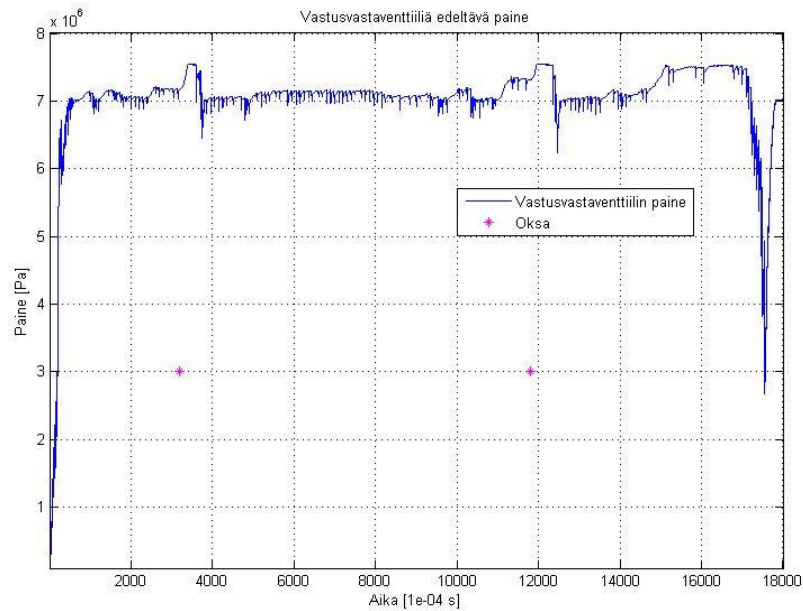
Virtuaalimallin avulla tarkastellaan tilannetta, jossa harvesteripää prosessoi puuta ja kuinka pituusmittalaitteen hydraulikkapiiri käyttäytyy mittapyörän osuessa oksaan. Virtuaalimalliin luotiin puu, jota harvesteripää prosessoi. Tarkemmin luodusta puun geomeriasta kappaleessa 5.3. Seuraavassa on esitetty virtuaalimallin käytös 70 bar:n painatuspainella. Taulukon 7 mukaisten muiden painatuspainoiden tulokset on esitetty liitteissä III-VII. Kuvassa 37 on esitetty virtuaalimallin sylinterin kammioiden paineet.



Kuva 37. Sylinterin kammion paineet.

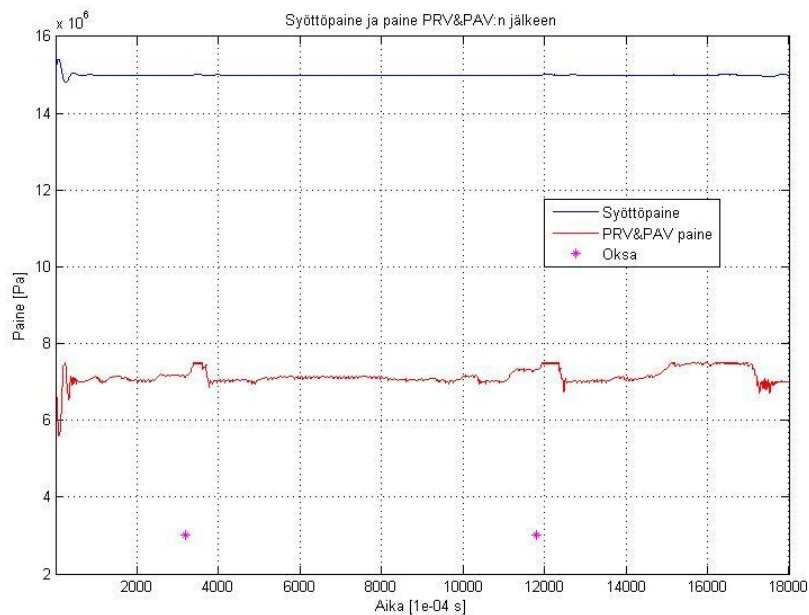
Kuvaa 37 tarkastelemalla voidaan havaita sylinterien kammioiden paineiden käyttäytymisen, kun mittapyörä törmää oksaan. Ajanhetket, jolloin mittapyörä törmää

oksaan on määritelty tarkastelemalla mekaniikkmallia, kun mittapyörä on törmäämisillään oksan tyvipuolelle. Vastusvastaventtiiliä edeltävän paineen käytös on havainnollistettu kuvassa 38.



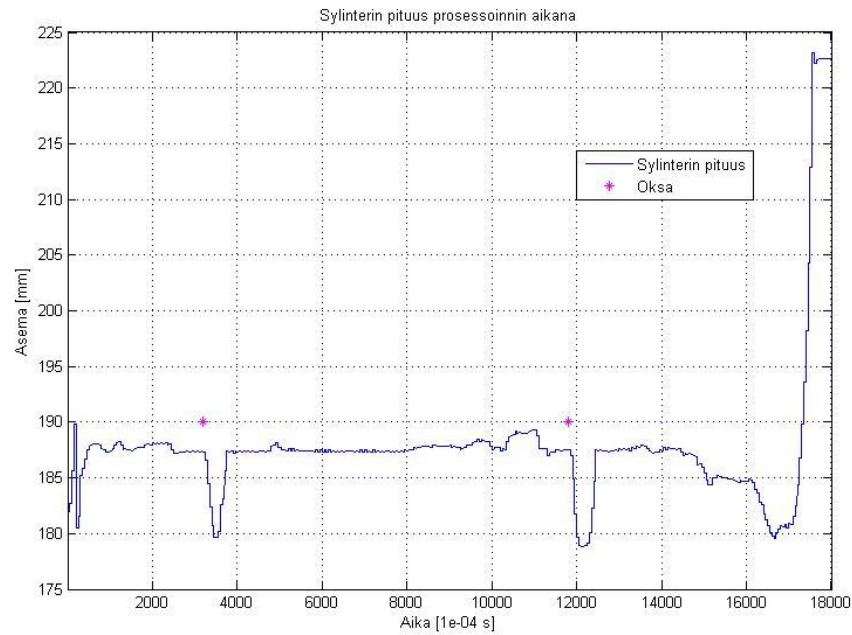
Kuva 38. Vastusvastaventtiiliä edeltävä paine.

Pumpun tuottama syöttöpaine ja paineenalennus- sekä paineenrajoitusventtiilin jälkeinen paine on esitetty kuvassa 39.



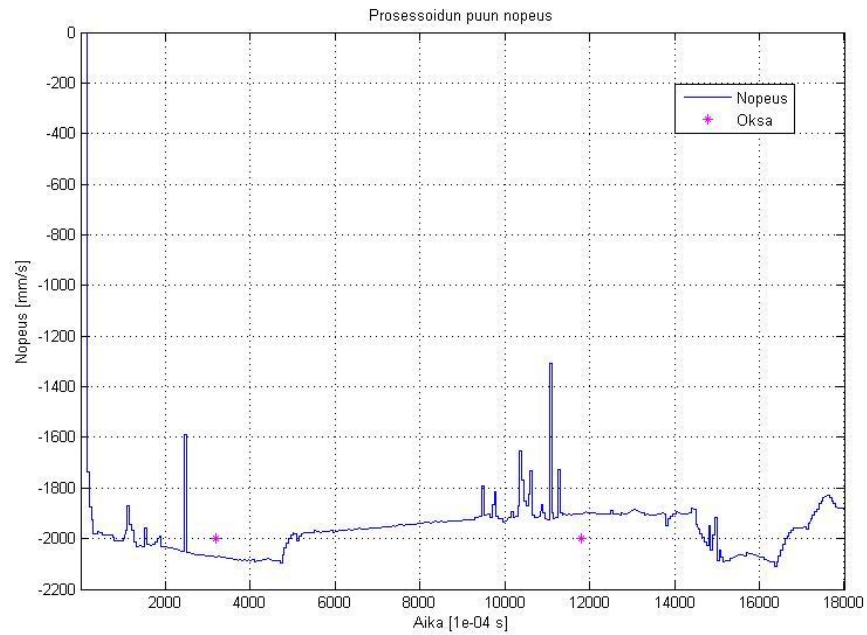
Kuva 39. Syöttöpaine ja paine alennuksen jälkeen.

Kuvia 38 ja 39 tarkastelemalla voidaan havaita yhtäläisyyttä. Paineenalennusventtiilin ja paineenrajoitusventtiilin välillä on kytkös. Paineen noustessa alennuspuolella rajapaineen tasolle, joka on asetettu 75 bar:n, vaihtuu alennus rajoitukseksi. Ja tämä toimii myös toiseen suuntaan. Pituusmittalaitteen sylinterin pituus puun prosessoinnin aikana on esitetty kuvassa 40.



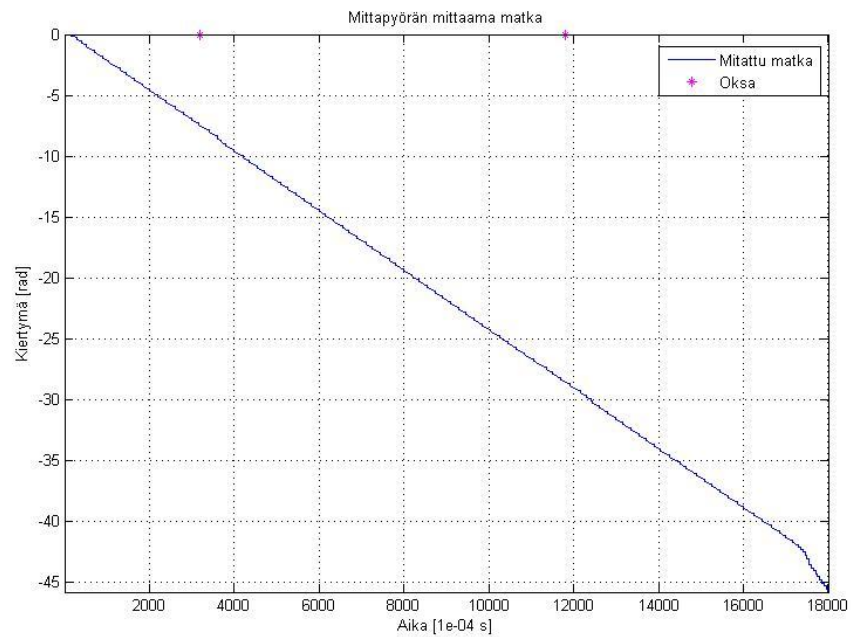
Kuva 40. Sylinterin pituus.

Tarkasteltaessa kuvaa pituusmittalaitteen sylinterin pituudessa, kuva 40, voidaan havaita ero oksien kohdalla sylinterin pituudessa. Tämä johtuu oksien koosta. Prosessoitavan puun nopeus on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41. Puun nopeus.

Puun nopeus virtuaalimallin syöttömoottorien rullille on asetettu 2 m/s, joka voidaan havaita kuvasta 41. Kuvasta voidaan myös havaita piikit, joissa puun nopeus on hidastunut hetkellisesti. Mittapyörän mittaama matka on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Mittapyörän mittaama matka.

Pituusmittalaitteen mittapyörän ja puun välillä on kontakti, jonka avulla saadaan

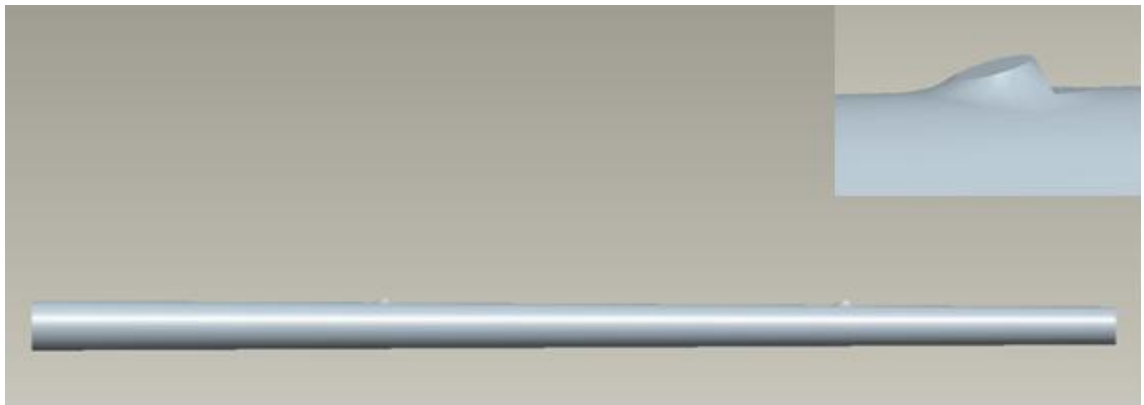
määritettyä mittapyörän mittaama matka.

5.3 Virtuaalimallin mekaniikka, kontaktit ja ohjaus

Virtuaalimallin mekaniikasta luotiin kuvan 18 kaltainen ja mekaniikka sisälsi taulukon 1 mukaiset komponentit. Harvesteripään ollessa tuotannossa, ja 3D CAD-mallien ollessa päivitettyt, niin tällöin ei syntynyt ongelmaa mekaniikan geometrian päivittämisestä.

Harvesteripään kontaktit luotiin samalla ohjelmistolla, jolla harvesteripään mekaanisten osien dynamiikka mallinnettiin. Menetelmänä kunkin kontaktin kuvaukseen on käytetty rangaistusmenetelmää. Erona kappaleessa 2.3.1 esitettyyn rangaistusvoiman kuvaukseen voidaan todeta, että ohjelmisto huomioi myös vaimennuksen laskennassaan.

Kontaktit prosessoitavan puun ja harvesteripään välillä luotiin kappaleessa 4.2 esitetyn kuvan 19 ja taulukon 3 mukaisesti. Geometria, joka kuvaa puuta päätettiin mallintaa CAD-ohjelmistolla. Kuvassa 43 on esitetty virtuaalimallissa hyödynnetyn puun geometria.



Kuva 43. Puun ja oksan geometria.

Kuvasta 43 voidaan huomata, että puuhun on yritetty mallintaa oksan muotoa. Puun tyvihalkaisija on 200 mm ja latvahalkaisija 150 mm sekä pituutta on 4000 mm. Toinen oksa on 5 mm korkeampi kuin ensimmäinen. Lisäksi puuta kuvaavalla geometrialla on kaikki 6 vapausastetta, jolla on pyritty kuvaamaan realistista tilannetta harvesteripään prosessoidessa puuta. Kontaktiparametrit harvesteripään ja puun välillä määriteltiin siten, että puun liike harvesteripäähän nähden olisi mahdollisimman realistinen. Tässä

tapauksessa realistisuudella tarkoitetaan esimerkiksi tapausta, jossa puussa olevan oksan takia harvesteripään terät aukeaisivat hieman prosessoinnin aikana. Tällöin voidaan todeta, että jokin kontaktiparametreista ei sovellu kuvaamaan kontaktia realistisesti ja parametria täytyy varioida.

Kontaktiparametrien oikeellisuutta arvioitiin tarkastelemalla pituusmittalaitteen mittapyörän mittaamaa matkaa, sylinterin asemaa sekä puun nopeutta virtuaalimallissa. Parametrit määriteltiin tutkimalla pelkkää mekaniikkamallia ja käyttämällä vakioarvoja mittapyörän sylinterivoimana sekä syöttömoottoreiden kulmanopeuksina. Harvesteripään virtuaalimallin prosessoidessa puuta tarkasteltiin kontaktipareja visuaalisesti sekä tarkkailemalla aiemmin arviointiperusteena esitettyjä kriteerejä. Lopulliset kontaktiparametrit määritettiin koko virtuaalimallia tarkastelemalla ja käyttämällä mittauksissa käytettyjen eri painatuspaineiden tuottamia voimia.

Virtuaalimalli sisältää hyvin yksinkertaisen ohjauksen, joka on toteutettu askelfunktioilla. Virtuaalimallissa ohjataan hydraulikkapiirin suuntaventtiilin asentoja sekä syöttömoottorien kulmanopeutta. Suuntaventtiili on oikeassa konstruktiossa on/off-tyyppinen venttiili, joten säätöpiirin luomista virtuaalimallille ei nähtyä tarpeelliseksi. Hydraulikkamallissa olevan suuntaventtiilin yhteyteen tosin on mahdollista luoda säätöpiiri ja näin ollen kyseistä komponenttia voidaan hyödyntää muissa tarkoituksissa. Syöttömoottorien yhteyteen luotu ohjaus mahdollistaa ala- ja yläsyöttömoottorien kulmanopeuksien ja pyörimissuuntien varioimisen. Kyseinen ohjaus on pyritty myös pitämään hyvin yksikertaisena ja on näin ollen toteutettu askelfunktioilla.

5.4 Tulosten analysointi

Taulukon 7 mukaisen liikkeen suorittamisen avulla saatiin määriteltyä hydraulikkakomponenttien parametreja vastaamaan paremmin mittausdataa. Tarkasteltaessa kuvia 33-36 havaitaan eroja. Nämä erot muodostuvat muun muassa nesteen reagoinnin tuomista ominaisuuksista, joita ei virtuaalimallissa ole huomioitu kuin hydraulisen nesteen kokoonpuristuvuuden muodossa. Lisäksi joidenkin komponenttien sisältämien mekaanisten jäsenten reagointinopeudet jouduttiin arvioimaan. Tarkastelemalla sylinterin +kammion käyrää, kuva 33, voidaan havaita, että yhtäläisyyksiä silti on havaittavissa. Sylinterin pituuden kasvaessa havaitaan paineipiikit, jotka viittaavat paineenalennusventtiilin toiminnan oikeellisuuteen. Sylinterin

vetäytyessä havaitaan samaisessa kuvassa vastusvastaventtiilin kuristuksen toiminta. Kuvia tarkastelemalla havaitaan, että luotu virtuaalimalli on nopeampi kuin oikea systeemi. -Kammion painetta tarkasteltaessa, kuva 34, voidaan havaita hetkellinen piikki, kun sylinteri työntyy ulos. Kyseistä piikkiä ei saatu eliminoidua parametreja säätäessä siten, että muut ilmiöt eivät olisivat hävinneet.

Tarkastelemalla sylinterin kammioiden paineita, kuva 37 ja liitteiden III-V ensimmäiset kuvat, ja vertaamalla näitä sylinterin pituuteen, kuva 40 ja liitteiden III-V neljännet kuvat, voidaan havaita painatuspaineen kasvun vaikutus sylinterin pituuteen mittapyörän törmätessä oksaan. Liitteen III kyseisiä kuvia tarkastelemalla havaitaan ensimmäisen oksan jälkeen sylinterin pituudessa heilahtelua eli mittapyörän hetkellinen pomppuminen puuta vasten. Painatuspainetta kasvatettaessa kyseinen ilmiö häviää, joka voidaan huomata liitteiden IV-VII vastaavista kuvista. Toisen oksan kohdalla kyseistä ilmiötä ei ole havaittavissa. Tämä voi johtua puun vapausasteiden määrästä eli mittapyörä saattaa sivuta hieman oksaa osumatta aivan keskelle sitä.

Tarkasteltaessa paineenalennus- ja paineenrajoitusventtiilin toimintaa, kuva 39 ja liitteiden III-V kolmatta kuvaa, havaitaan eri painealueilla toiminnassa eroja. Pienellä painatuspaineella rajapaine näiden kahden venttiilin välillä vaikuttaa olevan korkeampi kuin muilla painatuspaineilla. Mittausdataa kyseisestä venttiilistä ei saatu anturien vähyden takia, joten parametrien säätäminen kyseiselle venttiilille mittausdataan perustuen jäi. Toisena vaihtoehtona, tähän eri painealueilla havaittavaan eroon, on venttiilien mallinnustekniikka, joka voidaan huomata tarkastelemalla venttiilien yhtälöitä 19-23 ja 24-36. Paineenalennusventtiilin parametrit pysyvät suunnilleen samoina pois lukien paineen muutoksen venttiilin yli.

Liitteissä VI ja VII on esitetty tutkitun piirin käytös 70 bar:lla ja 80 bar:lla, kun piiriin on lisätty paineakku. Tarkastelemalla paineakun paineen kuvaajia eri painatuspaineilla, kuvia VI.7 ja VII.7, ja vertailemalla kyseisiä kuvaajia vastusvastaventtiilin paineeseen, kuvat VI.2 ja VII.2, voidaan havaita yhtäläisyyttä. Tämä kiellii paineakun toiminnan oikeellisuudesta. Paineakun paineen kuvia tarkastellessa voidaan havaita myös esitäyttöpaineen suuruus, joka on ollut 65 bar.

Mekaniikan mallinnus monikappaledynamiikkaohjelmistolla onnistui hyvin. Eräiden 3D CAD -komponenttien massat ja inertiaat eivät päivittyneet siirrettäessä geometriatietoja Pro/ENGINEER -ohjelmistosta MSC Adams 2010 -ohjelmistoon, mutta kappaleiden

massa- ja inertiatietoja onnistui korjata jälkimmäisen ohjelmiston puolella vaivatta. Harvesteripään mekaniikasta tuli hyvin kattava eli sisältäen tärkeimmät komponentit, joita tarvitaan puun prosessointiin. Syöttörullien kohdalla jouduttiin tekemään yksinkertaistukset mallintamalla kyseiset rullat yksinkertaisina sylinterimäisillä geometrioilla, sillä oikean rullan geometria sisältää hyvin pieniä yksityiskohtia. Kyseisillä yksinkertaistuksilla pyrittiin vaikuttamaan laskenta-aikaan.

Kappaleiden välisten kontaktien mallinnusta voidaan yleisesti pitää suuntaa antavina sillä kappaleiden väliset kontaktit eivät aina ole samanlaiset reaaliympäristössä, koska moni tekijä vaikuttaa kontaktiin. Harvesteripään ja puun välisten kontaktiparametrien määrittämisessä jouduttiin tekemään kompromisseja, koska lähtökohtana kontaktien mallinnuksessa oli mahdollisimman realistinen puun liike prosessoinnin aikana. Virtuaalimallissa olevat kontaktit kuvaavat vähintään tyydyttävästi oikeata tilannetta vaikka kontaktin kuvaukseen kyseisellä ohjelmistolla oli tarjolla kaksi eri menetystä. Tarkastelemalla prosessoitavan puun nopeutta, kuvaa 41 ja liitteiden III-V viidettä kuvaa, voidaan havaita hetkellisiä puun hidastumisia, jotka viittaisivat siihen että oksa on osunut harvesteripään runkoon ja näin ollen nopeus on hidastunut.

Virtuaalimallin suuntaventtiiliä ohjattiin on/off -venttiilin tavoin eli ääriasennosta toiseen ja tällaisessa käytössä luotu ohjaus toimi moitteettomasti. Venttiilin asentojen reagoiminen on nopeampaa kuin oikeassa mallissa, joka voidaan huomata kuvasta 33. Reagoimisen nopeus johtuu mallinnustavasta. Mekaniikkamalliin välitettävät syöttömoottorien rullien kulmanopeudet välittyivät oikein, joka voidaan havaita kuvasta 41 ja liitteiden III-V viidennestä kuvasta. Mekaniikkamalliin mallinnetun puun nopeus pysytteli lähes sille määritetyllä tasolla. Puun syöttönopeuteen vaikuttaa myös puun geometria sekä harvesteripään ja puun väliset kontaktit. Jatkokehityskohteena syöttömoottorien rullien kulmanopeuksien ohjaukseen olisi rullien kulmanopeuksien rad/s muuntaminen puun syöttönopeudeksi m/s.

Tarkastellessa liitteen VIII mitattuja tuloksia harvesteripään puun prosessoimisesta 70 bar:n painatuspaineella voidaan havaita kuinka vastusvastaventtiiliä edeltävä paine seuraa sylinterin kammion puoleista painetta. Tarkastelemalla puun halkaisijaa ja sylinterin pituutta, kuvat VIII.2. ja VIII.4., voidaan havaita kuinka puun halkaisija kasvaa hetkellisesti, joka näkyy sylinterin liikkeenä. Tämä voi johtua joko muodosta puussa tai mahdollisesta terien aukeamisesta prosessoinnin aikana. Samaisella

ajanhetkellä voidaan havaita sylinterin +kammiossa paineen rajumpi vaihtelua. Mahdollinen syy tällaiselle käytökselle on puussa olevan epäjatkuvuuskohdan johdosta terät aukeavat hieman ja pituusmittalaitteen sylinteri pääsee työntymään ulospäin.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn päätavoite oli olla eräänlainen kickoff harvesteripään virtuaalimallinnuksessa sekä toimia samalla tutkimuksena voidaanko virtuaalimallinnusta hyödyntää tulevaisuudessa osana Waratah OM Oy:n tuotekehitysprosessia. H414 harvesteripäästä luotiin virtuaalimalli, joka sisälsi harvesteripään tärkeimmät mekaaniset komponentit, pituusmittalaitteen hydrauliiikan sekä harvesteripään ja puun väliset kontaktit. Lisäksi virtuaalimallissa ohjattiin hydrauliiikkapiirin suuntaventtiiliä ja syöttörullia. Virtuaalimalli siis sisälsi kaikki siltä vaaditut osa-alueet. Työssä esiteltiin myös kuinka kontakteja voidaan kuvata yksinkertaisesti eri menetelmillä, joita käytetään monikappaledynamiikassa kontaktien kuvaukseen. Virtuaalimallinnuksen implementoimista osaksi tuotekehitystä tutkittiin tarkastelemalla Waratah OM Oy:n tuotekehityksen sisältämiä prosesseja ja työssä on esitetty prosessikaavio virtuaalimallinnukselle, joka huomioi muut tuotekehityksen prosessit. Päätavoite saavutettiin vähintään tyydyttävästi.

Tarkastelemalla virtuaalimallin avulla saavutettuja tuloksia voidaan todeta, että virtuaalimallinnusta voidaan hyödyntää varauksella tuotekehityksessä. Edellytyksenä virtuaalimallin hyödyntämiselle on virtuaalimallin hydraulisten komponenttien jatkojalostaminen, jotta saadaan luotettavuutta virtuaalimallinnukseen kokonaisuutena. Hydrauliiikan mallinnus käytössä olleella ohjelmistolla ja menetelmällä asettivat omat etunsa ja rajoitteensa mallinnuksen suhteen. Hydrauliiikan kuvaaminen tavallisilla differentiaaliyhtälöillä johtaa hyvin usein tilanteisiin jossa systeemit ovat jäykkiä ja tämä johtaa numeerisesti tarkastellen ongelmallisiin tilanteisiin. Mahdollisena vaihtoehtona virtuaalimallinnuksen luotettavuuden hankintaan, erityisesti hydrauliiikan osalta, on kartoittaa ohjelmistokokonaisuuksia, jotka sisältävät virtuaalimallinnuksen osa-alueet.

Virtuaalimallin jalostamisen jälkeen on mahdollista tarkastella häiriötilanteiden vaikutusta puun prosessointiin. Pumpun paineen romahtaminen on hyvä esimerkki häiriötilanteesta tilanteesta. Ajatellen muita harvesteripään toimintoja voidaan todeta, että kyseisen applikaation koko virtuaalimallinnuksessa on haastetta sillä monet muut toiminnot ovat monimutkaisempia.

LÄHDELUETTELO

- [1] Waratah. Harvesting & Processing Heads. H414. Saatavissa:
<http://www.waratah.net/h414.html>
- [2] Ulrich, Karl T., Eppinger, Steven D. Product design and development - 3rd edition. McGraw-Hill. 2004. 366 s. ISBN 0-07-247146-8
- [3] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote. K-H. Engineering design: a systematic approach – 3rd edition. Springer. 2007. 617s. ISBN 978-1-84628-318-5.
- [4] Airila M., Mekatroniikka. Otatieto. 1996. 367 s. ISBN 951-672-239-3.
- [5] Nof, Shimon Y. Springer handbook of automation. Springer. 2009. 1812 s. ISBN 978-3-540-78830-0.
- [6] Kreith F. Mechanical Engineering Handbook. CRC Press. 1998. 2466 s. ISBN 978-0-8493-9418-8.
- [7] Bishop Robert H. The Mechatronics Handbook. CRC Press. 2002. 1272 s. ISBN 0-8493-0066-5.
- [8] Bentley J. P. Principles of Measurement Systems - 4th edition. Pearson Prentice Hall. 2005. 528 s. ISBN 0-13-043028-5.
- [9] Alciatore D. G. Introduction to mechatronics and measurement systems - 4th edition. McGraw-Hill. 2012. 553 s. ISBN 978-0-07-338023-0.
- [10] Wriggers, P. Computational contact mechanics. John Wiley & Sons Ltd. 2002. 441 s. ISBN 0-471 49680-4.
- [11] Drumwright, E. A Fast and Stable Penalty Method for Rigid Body Simulation. 2008, Saatavissa: <http://www-robotics.usc.edu/~drumwrig/publications.html>
- [12] Mikkola, A. Koneen simuloinnin työkurssi. 2010. Luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.
- [13] Waratah OM Oy. Toimintajärjestelmä. 2012
- [14] Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. Hydraulitekniikka. 2008, WSOY, 487 s.

ISBN 978-951-0-33844-5.

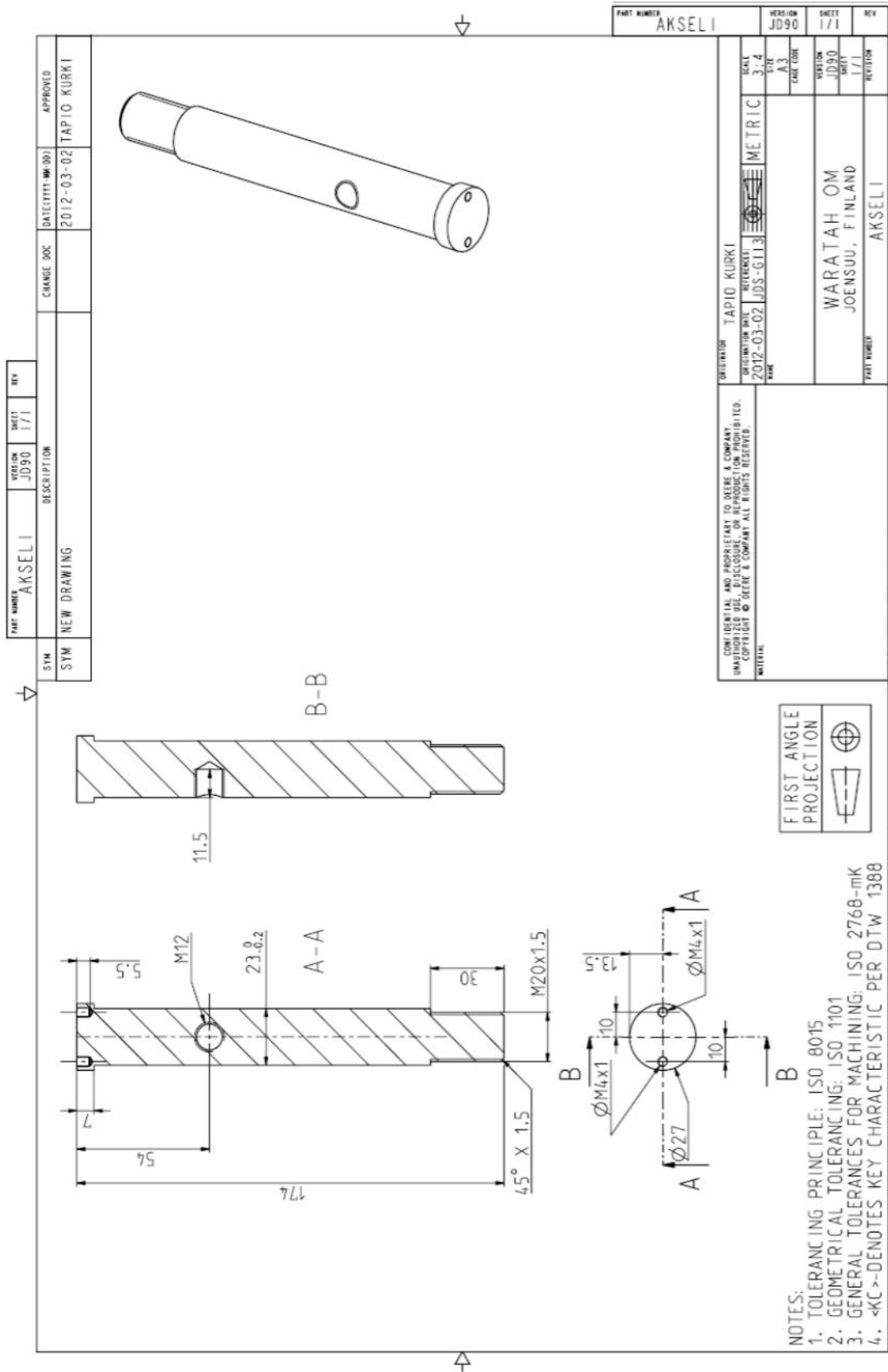
- [15] Eskola, T. Reaaliaikainen virtuaalihydrauliikka osana todellista konejärjestelmää. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Lappeenranta, 2002. 62 s.
- [16] Åman, R., Methods and models for accelerating dynamic simulation of fluid power circuits. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto. Lappeenranta, 2011, 69 s.
- [17] Mikkola, A. Simulation of a Mechatronic Machine. 2010. Kurssimateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.
- [18] Handroos, H. M., Vilenius, M. J. The utilization of Experimental data in modelling hydraulic single stage pressure control valves. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and control - vol. 112. 1990. 7 s.
- [19] Mikkola, Aki. Professori, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. Diplomityöpalaveri 18.5.2012 & 25.5.2012.
- [20] HYDAC INTERNATIONAL GmbH. Hydraulic accumulators, Diaphragm accumulators. Saatavissa: <http://www.hydac.com/de-en/products/hydraulic-accumulators/diaphragm-accumulators/show/Download/index.html>
- [21] KELLER AG für Druckmesstechnik. Pressure Transmitters, Series 23(S)Y / 25 Y. Saatavissa: http://www.keller-druck.com/picts/pdf/engl/23sy_e.pdf
- [22] ASM Automation Sensorik Messtechnik GmbH. POSIROT / PRAS. Analog Magnetic Angle Sensors. Saatavissa: http://www.asm-sensor.com/asm/pdf/pro/pras_man_en.pdf
- [23] HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Data Acquisition Systems, Rugged Data Acquisition, SoMat eDAQlite. Saatavissa: <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/rugged-data-acquisition/somat-edaqlite/>
- [24] HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Data Acquisition Systems, Rugged Data Acquisition, SoMat eDAQlite. Komponentit. Saatavissa: http://www.hbm.com/hbm_doc/html/prod_somat_edaqlite.htm

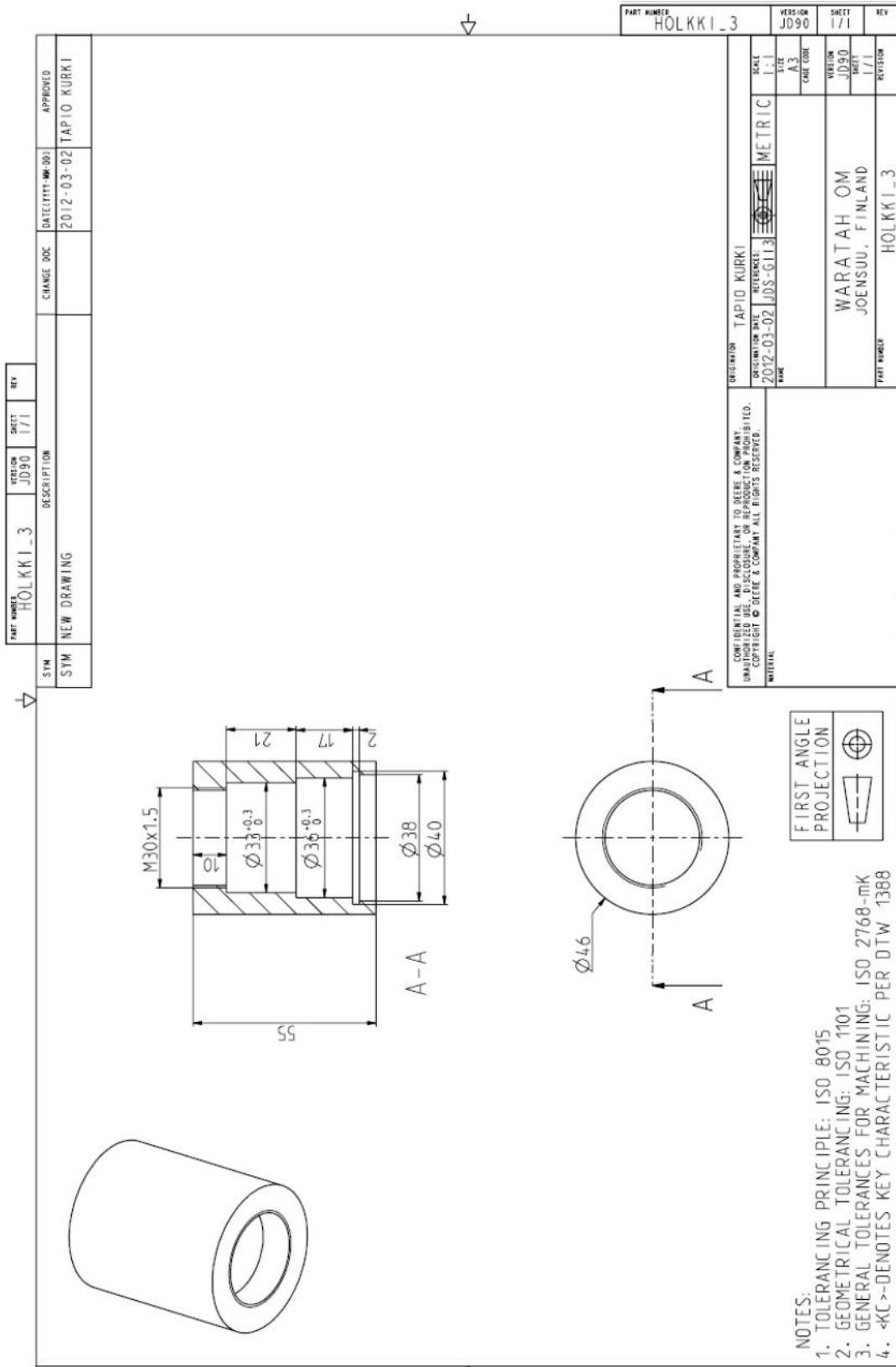
[25] Parker Hannfin Corporation. Hydraulic Valves - Industrial Standard, Catalogue HY11-3500/UK. D1VW NG06 -suuntaventtiili. Luku 2, s. 7-14. Saatavissa: http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/HY11-3500UK/HY11-3500UK_10.2011_PDFoverall.pdf

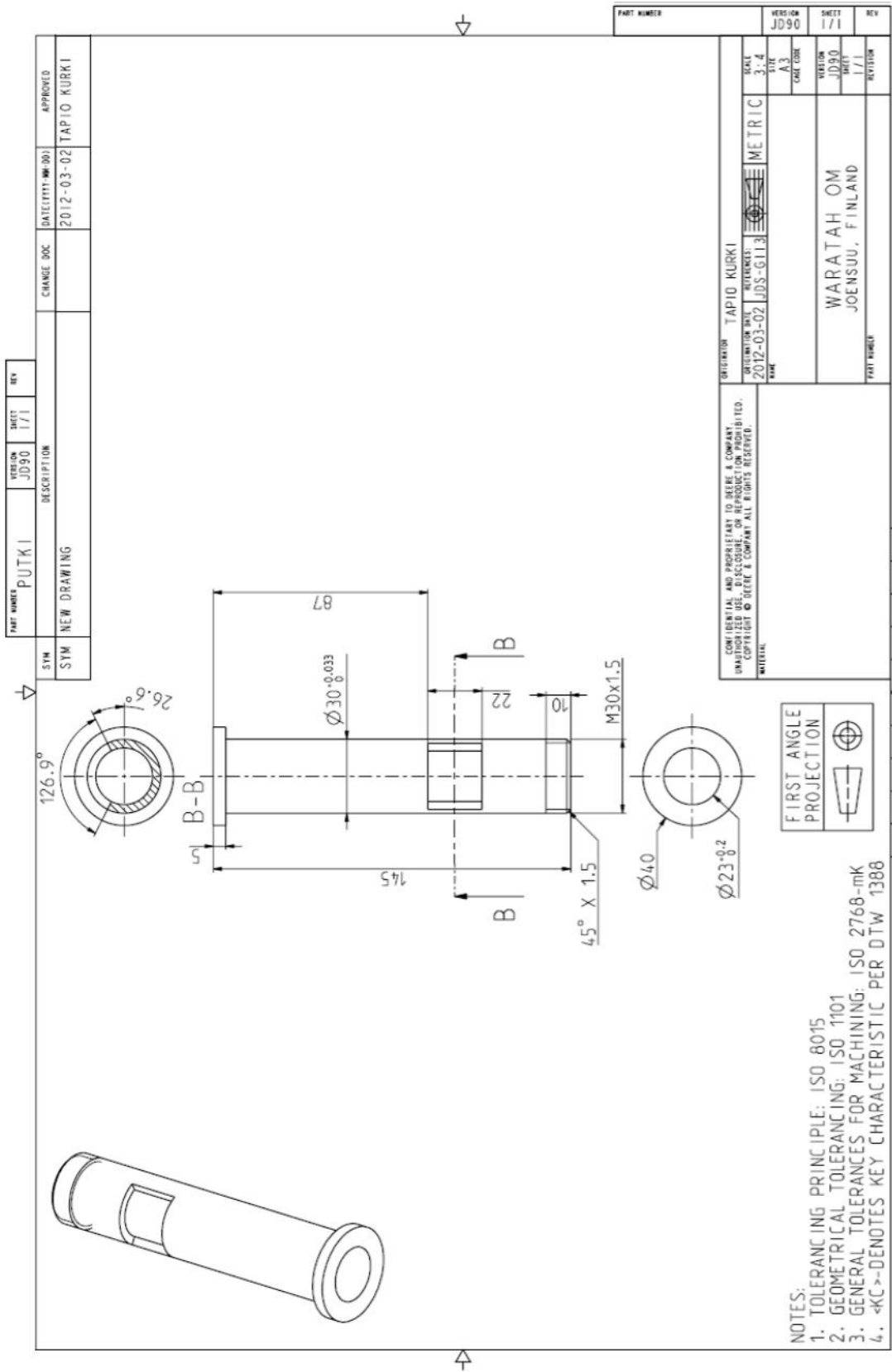
[26] Parker Hannfin Corporation. Hydraulic Valves - Industrial Standard, Catalogue HY11-3500/UK. PRDM 3-tiepaineenalennusventtiili. Luku 7, s. 17-22. Saatavissa: http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/HY11-3500UK/HY11-3500UK_10.2011_PDFoverall.pdf

[27] Parker Hannfin Corporation. Hydraulic Valves - Industrial Standard, Catalogue HY11-3500/UK. 9F400 Manatrol -vastusvastaventtiili. Luku 10, s. 41-42. Saatavissa: http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/HY11-3500UK/HY11-3500UK_10.2011_PDFoverall.pdf

MITTAUSKOMPONENTIT SYLINTERIN PITUUELLE







VIRTUAALIMALLIN HYDRAULIIKKAPIIRIN PARAMETRIT

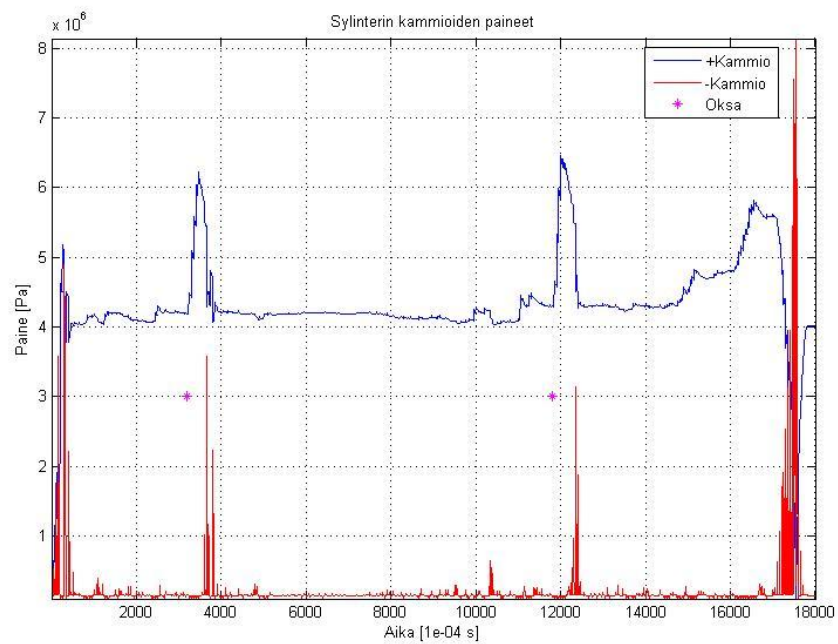
Taulukko II.1 Hydrauliiikkaparametrit.

Komponentti	Parametri	Arvo
Pumppu	Teho	18 kW
	Maksimi tilavuusvirta	92 l/min
	Oletuspaine	150 bar
	Empiirinen vakio k pumpulle	2.57e-09
	Hyötysuhde	0.9
	Aikavakio	0.1 s
	Alkutilavuus	1.00e-3 m ³
Paineenalennusventtiili	Rajapaine	75 bar
	Paine ennen venttiiliä p	150 bar
	Paineen muutos Δp	80 bar
	Aikavakio	0.005 s
	Paineenalennusventtiilin puoliempiirinen vakio K_{pav1}	4.11e-08
	Paineenalennusventtiilin puoliempiirinen vakio K_{pav2}	2.51e-08
Paineenrajoitusventtiili	Referenssipaine	70 bar
	Paine pisteessä 1	75 bar
	Tilavuusvirta pisteessä 1	5 l/min
	Paine pisteessä 2	80 bar
	Tilavuusvirta pisteessä 2	15 l/min

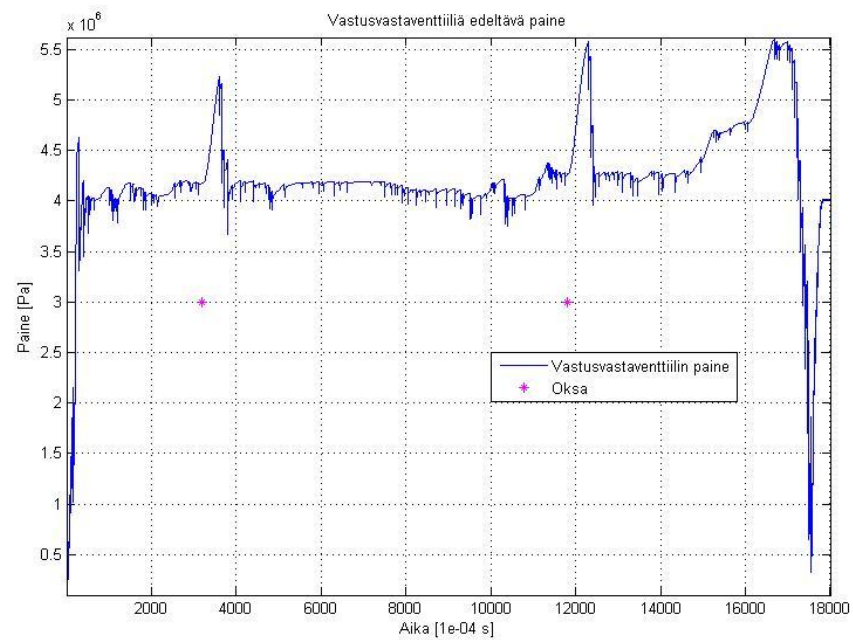
Taulukko II.1 Hydrauliiikkaparametrit. (Jatkuu)

Komponentti	Parametri	Arvo
4/3-Suuntaventtiili	Aikavakio	0.005 s
	Nominaalinen tilavuusvirta	5 l/min
	Paine-ero tilavuusvirralla	24 bar
	Maksimi jännite	10 V
	Vuodon tilavuusvirta	0.001 l/min
	Paine-ero tilavuusvirralla (tankin portti)	50
	Paine-ero tilavuusvirralla (ylläpitopaineen portti)	50
Vastusvastaventtiili	Vastaventtiilin empiirinen vakio K_{vvv1}	1.32e-08
	Vastusventtiilin empiirinen vakio K_{vvv2}	7.2e-09
Sylinteri	Männän halkaisija	25 mm
	Varren halkaisija	16 mm
	Iskun pituus	50 mm
	Sylinterin minimi pituus	175 mm
Paineakku	Paine-ero tilavuusvirralla	5 bar
	Tilavuusvirta paine-erolla	25 l/min
	Akun max. tilavuus	3.2e-04 m ³
	Tilavuus alkutilanteessa (öljy)	7.9e-05 m ³
	Tilavuus alkutilanteessa (kaasu)	2.0e-04 m ³
	Esitäyttöpaine	65 bar
	Adiabaattivakio	1.4

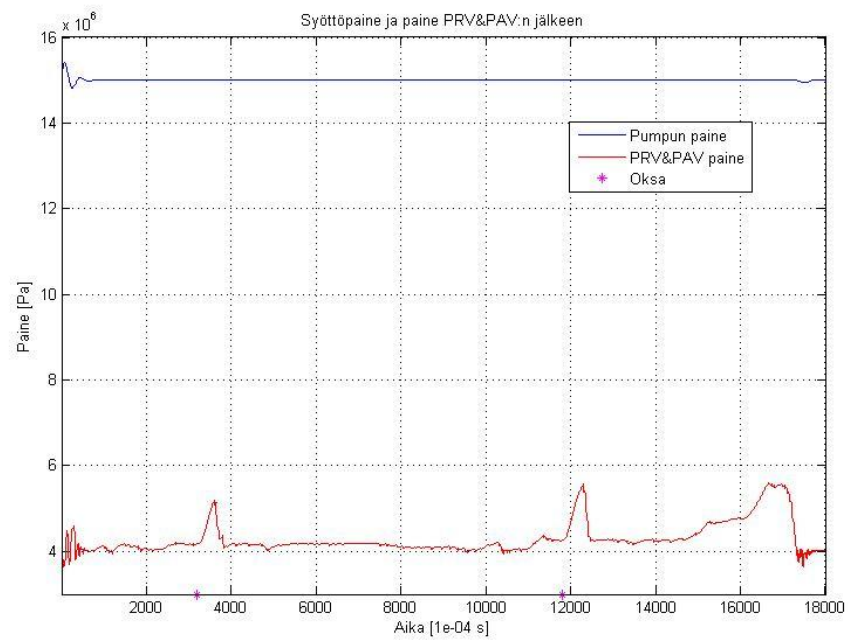
TULOKSET 40 BAR:N PAINATUSPAINEELLA



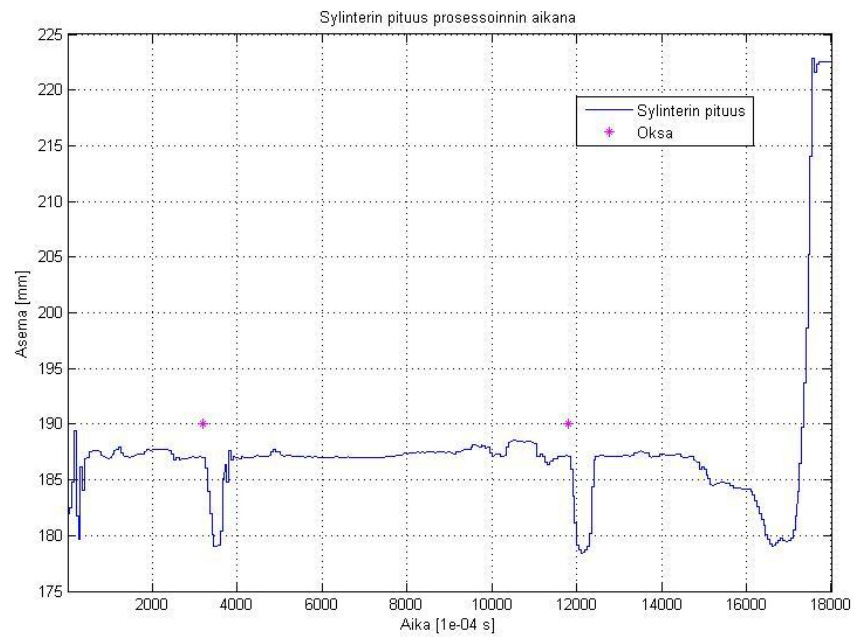
Kuva III.1. Sylinterin kammioden paineet.



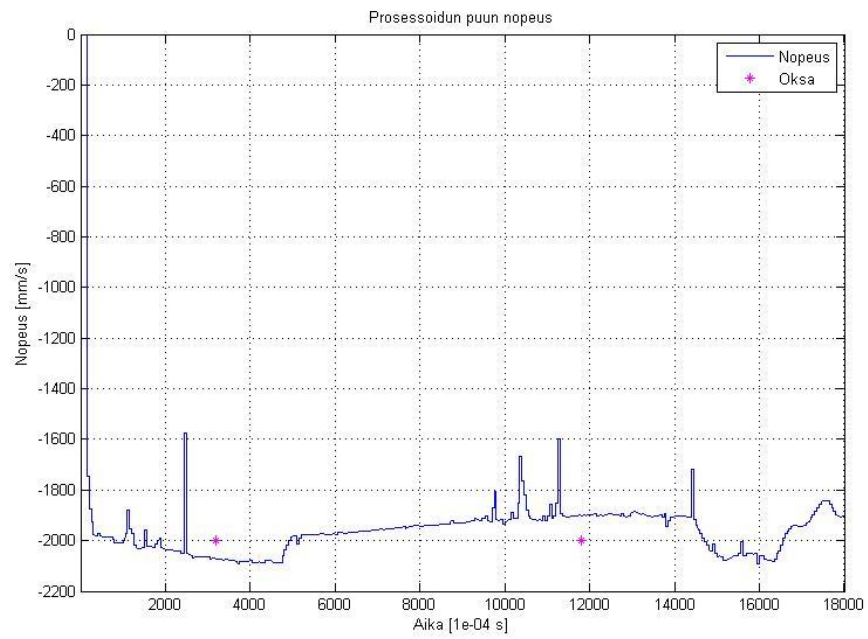
Kuva III.2. Paine ennen vastusvastaventiiliä.



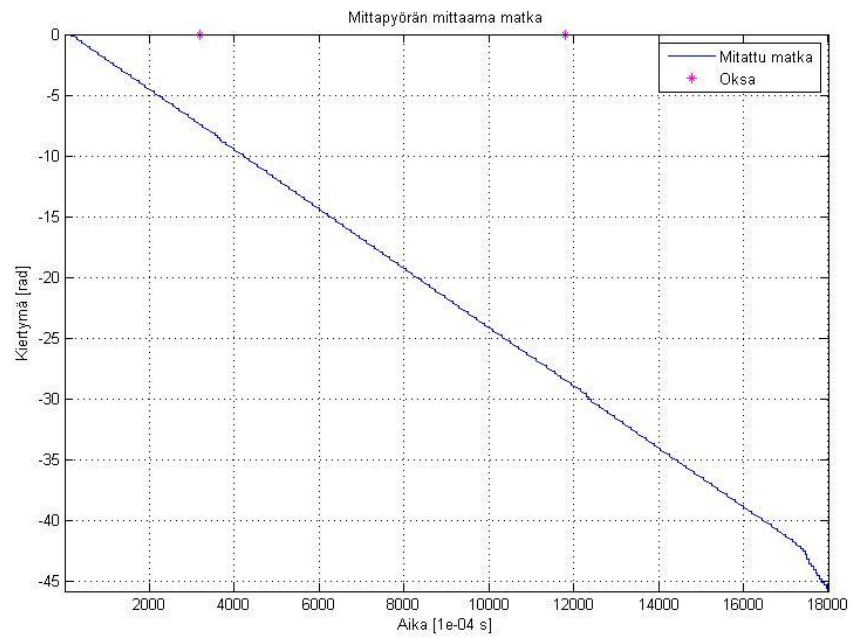
Kuva III.3. Syöttöpaine ja paine alennuksen jälkeen.



Kuva III.4. Sylinterin pituus.

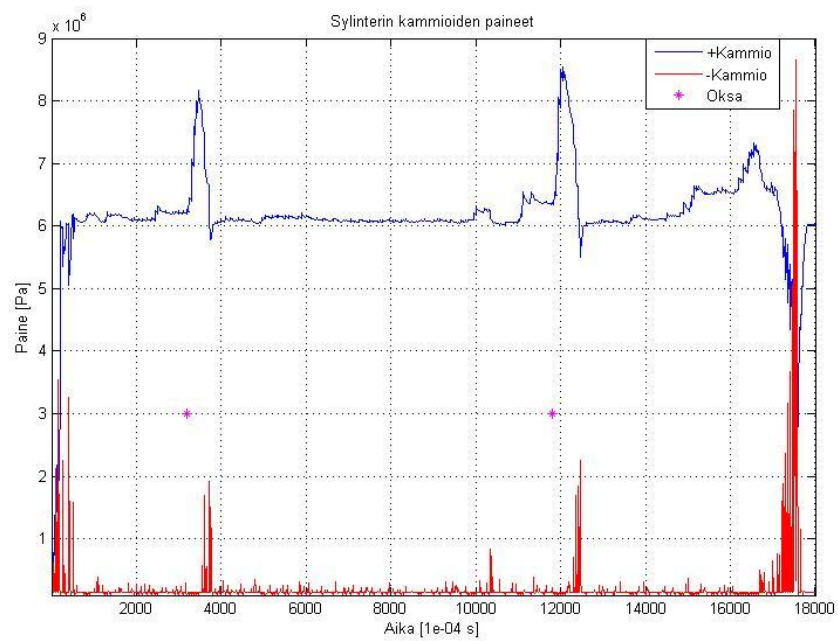


Kuva III.5. Puun nopeus

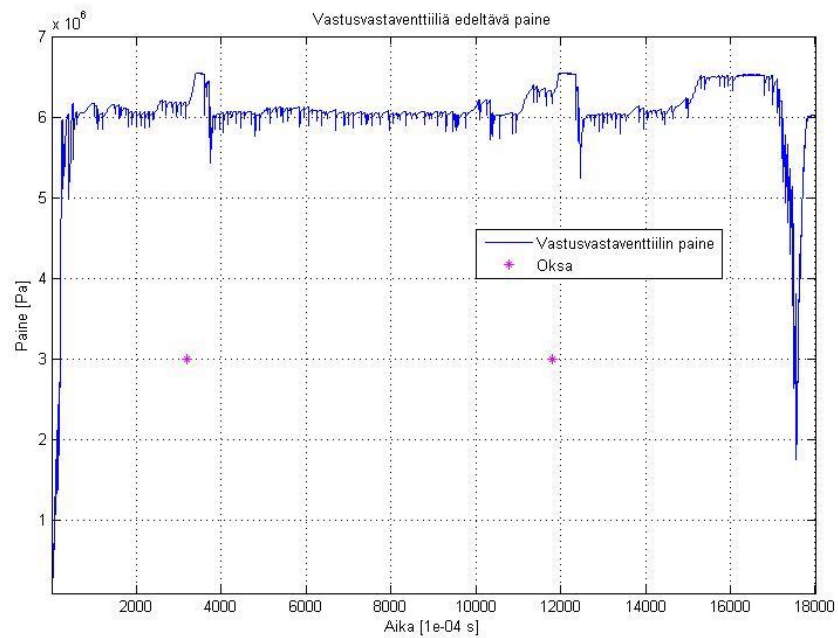


Kuva III.6. Mittapyörän mittaama matka.

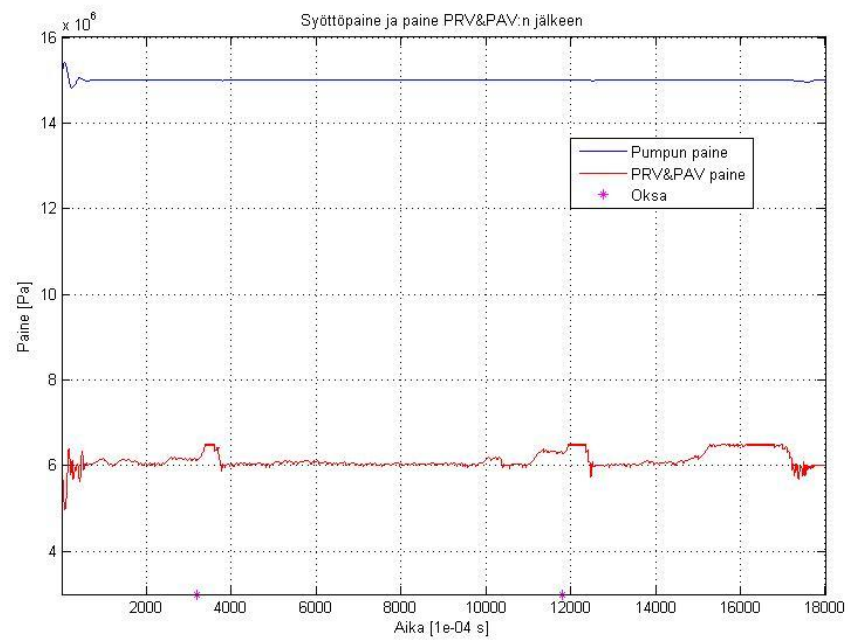
TULOKSET 60 BAR:N PAINATUSPAINEELLA



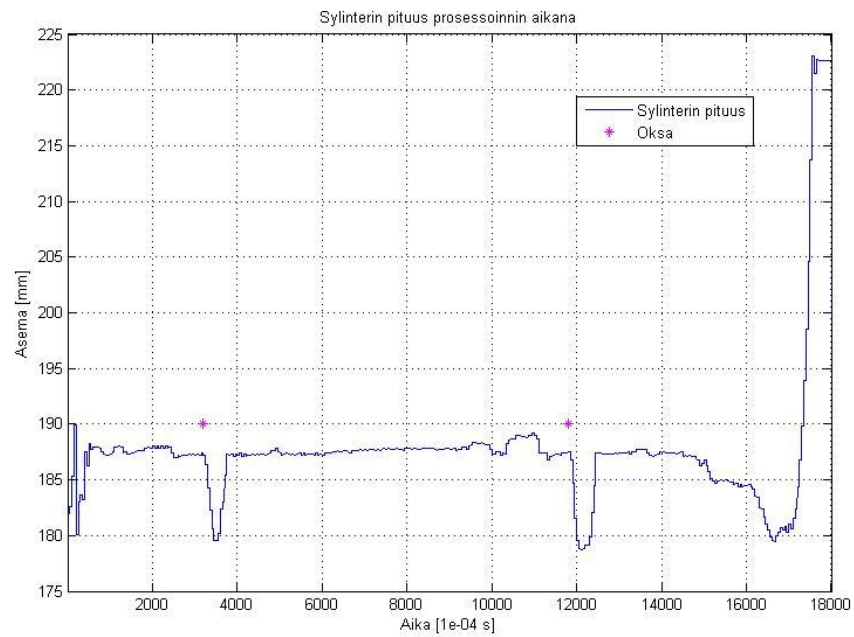
Kuva IV.1. Sylinterin kammioiden paineet



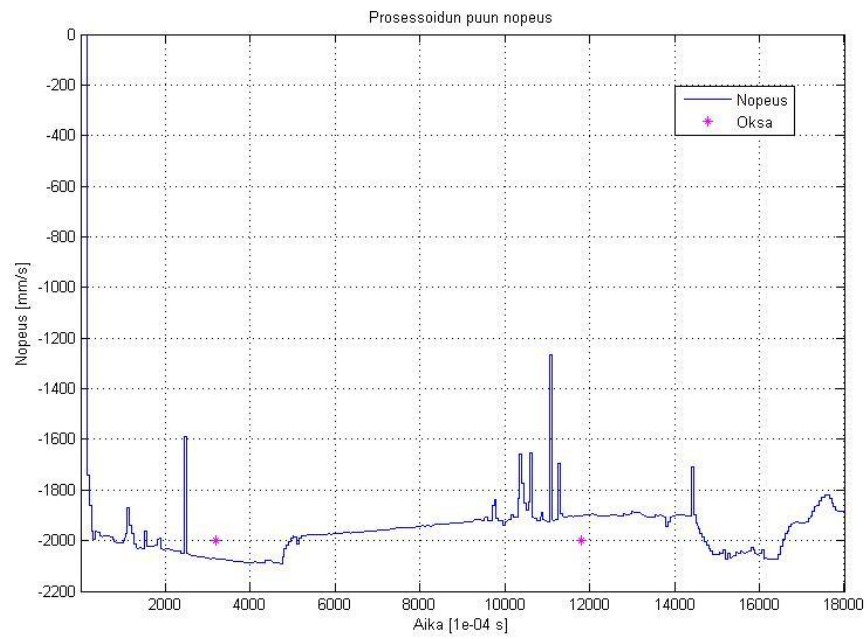
Kuva IV.2. Paine ennen vastusvastaventiiliä



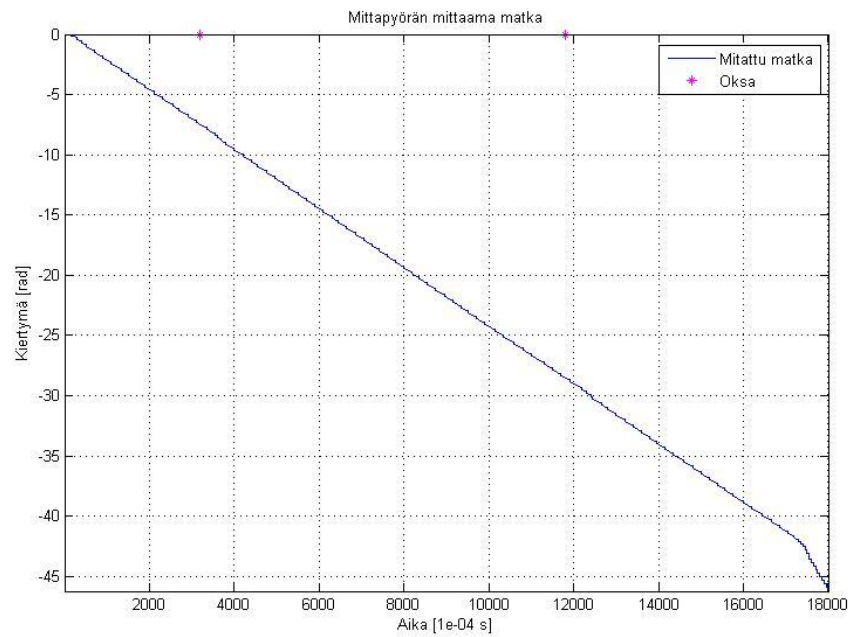
Kuva IV.3. Syöttöpaine ja paine alennuksen jälkeen.



Kuva IV.4. Sylinterin pituus.

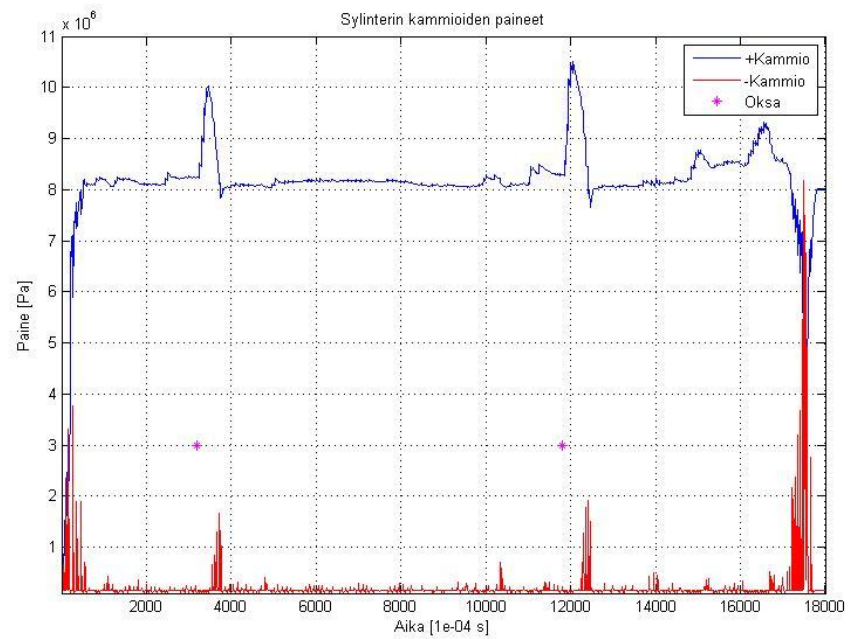


Kuva IV.5. Puun nopeus.

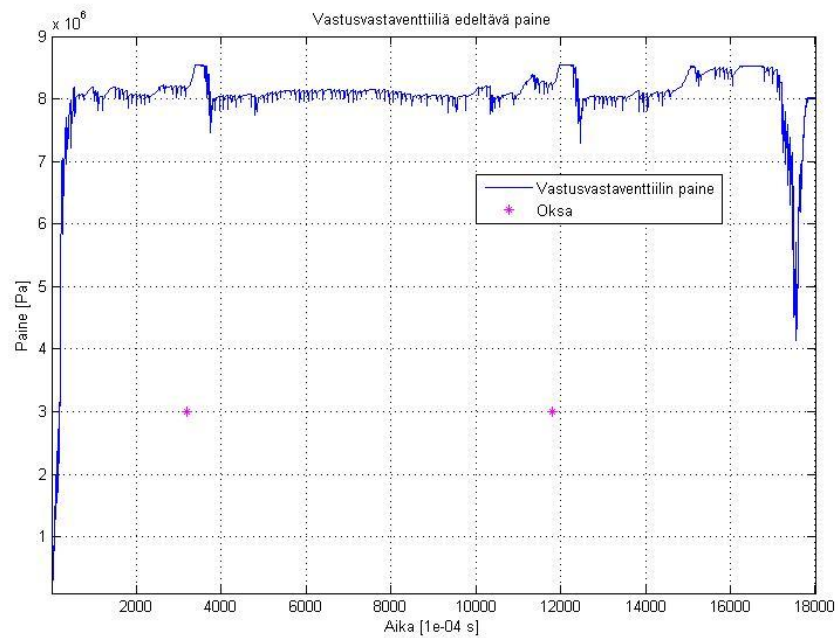


Kuva IV.6. Mittapyörän mittaama matka.

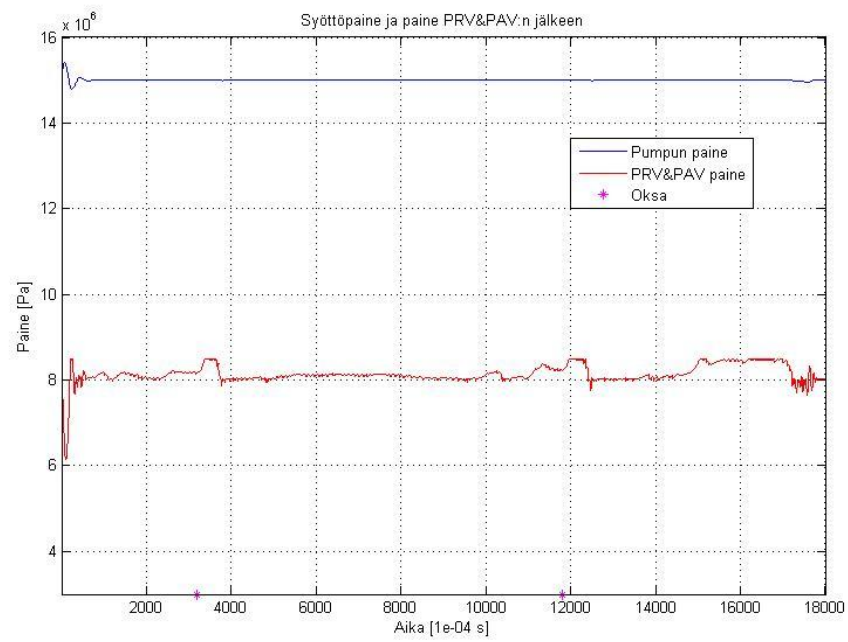
TULOKSET 80 BAR:N PAINATUSPAINEELLA



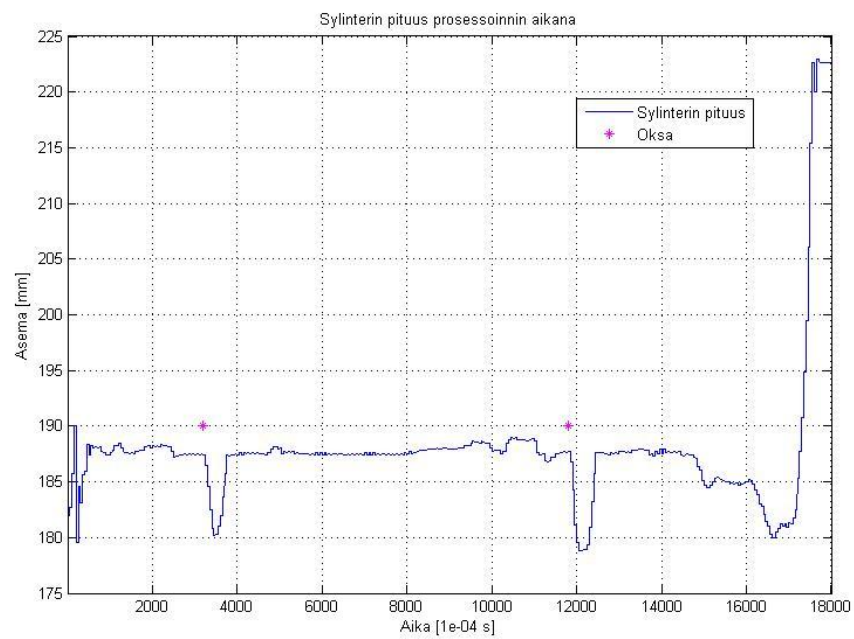
Kuva V.1. Sylinterin kammioiden paineet.



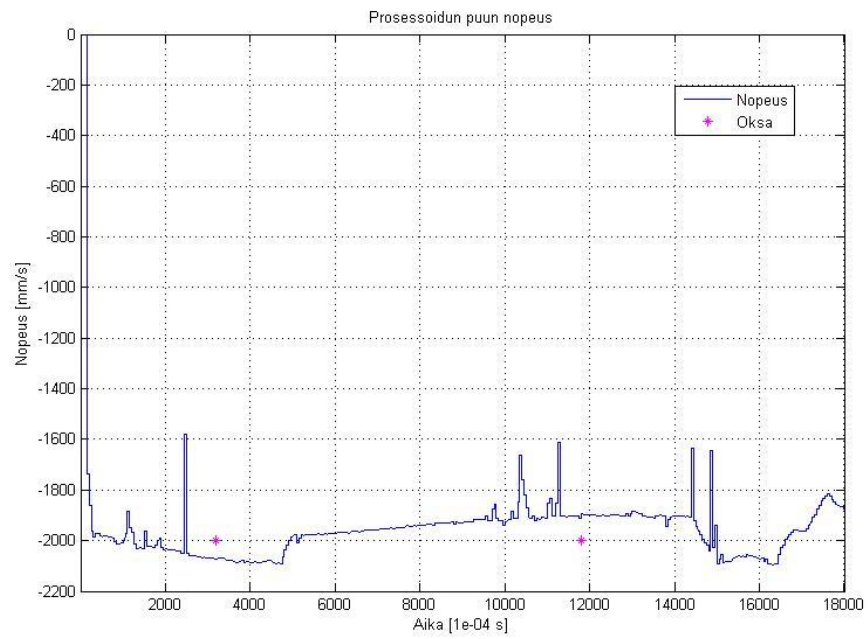
Kuva V.2. Paine ennen vastusvastaventtiiliä



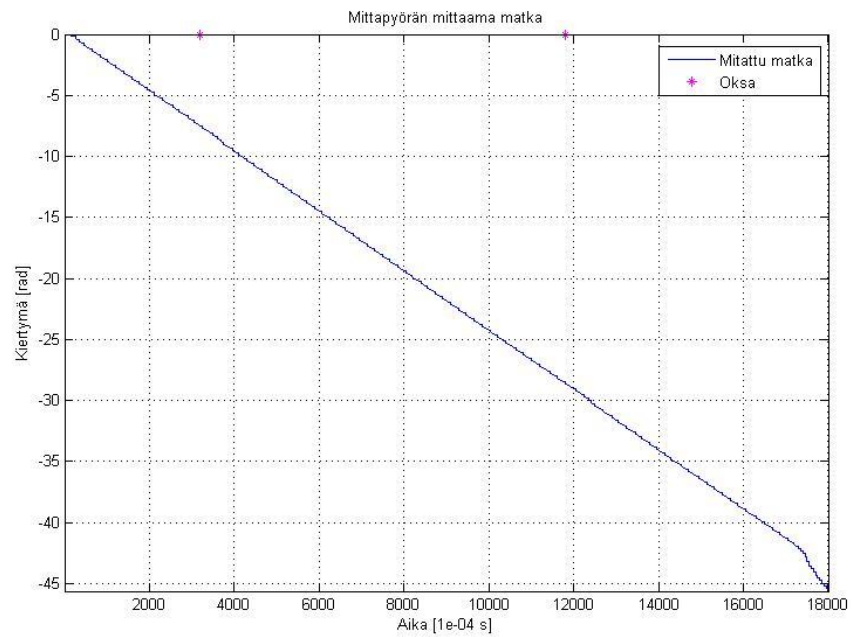
Kuva V.3. Syöttöpaine ja paine alennuksen jälkeen.



Kuva V.4. Sylinterin pituus.

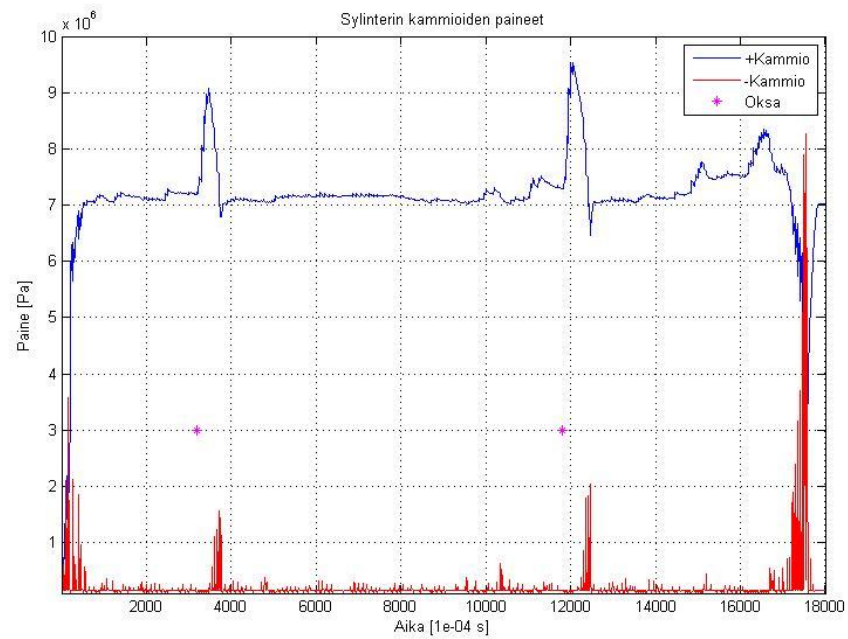


Kuva V.5. Puun nopeus.

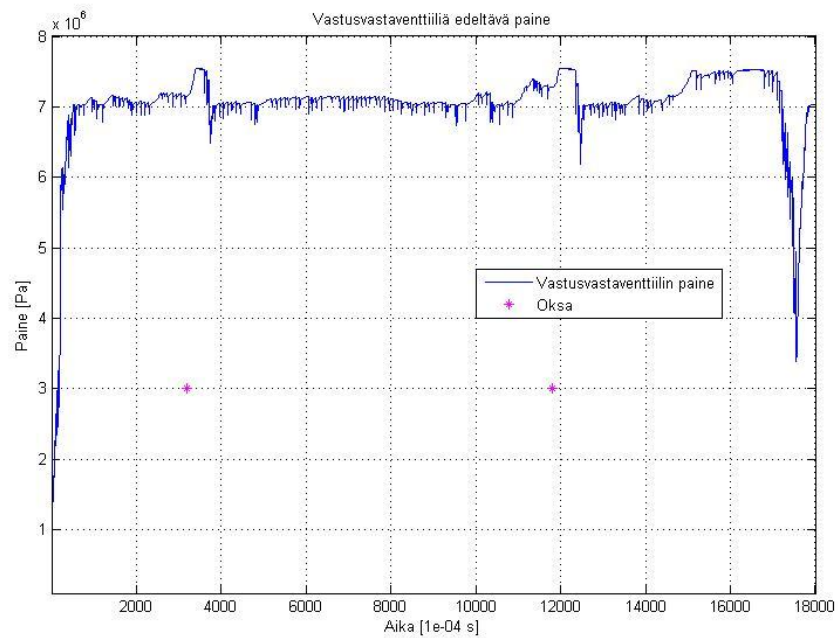


Kuva V.6. Mittapyörän mittaama matka

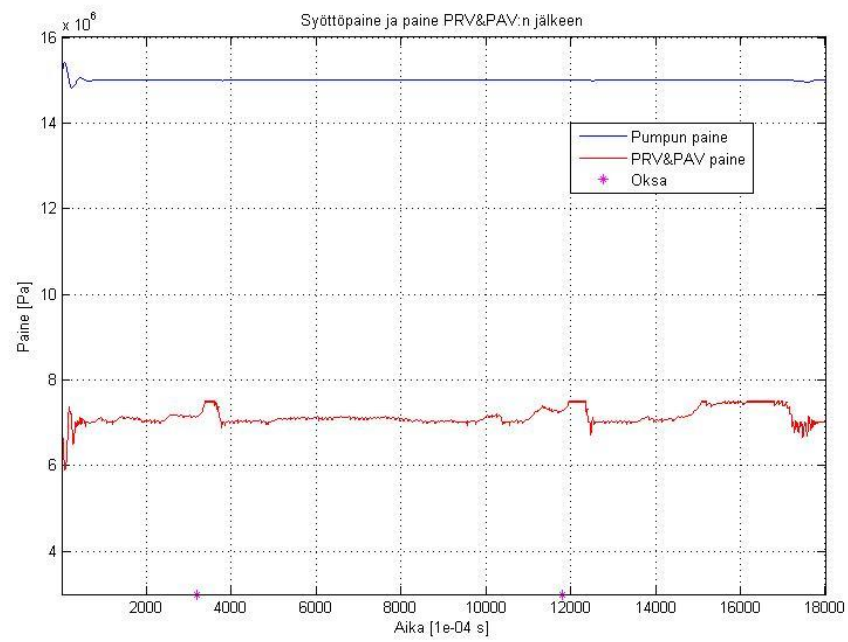
TULOKSET 70 BAR:N PAINATUSPAINEEILLA JA PAINEAKULLA



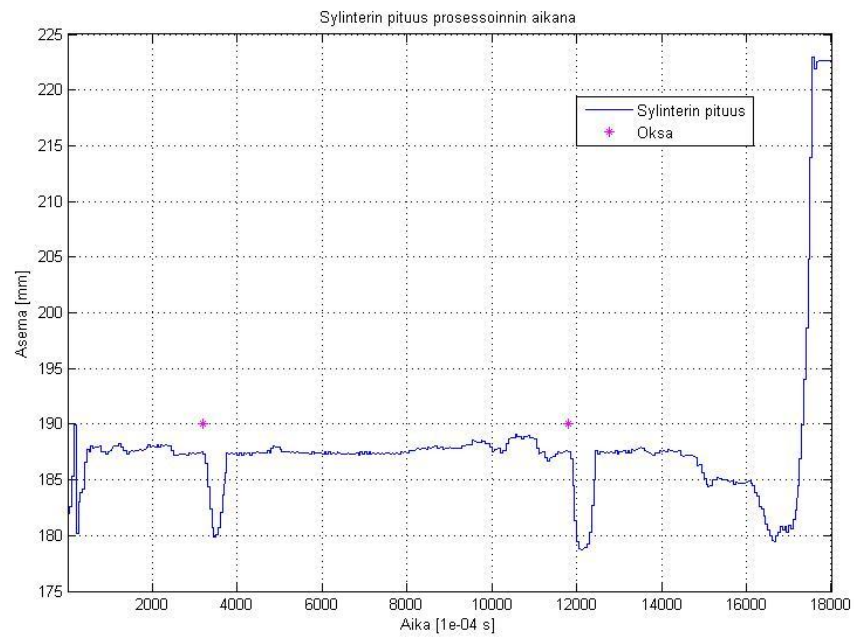
Kuva VI.1. Sylinterin kammioiden paineet.



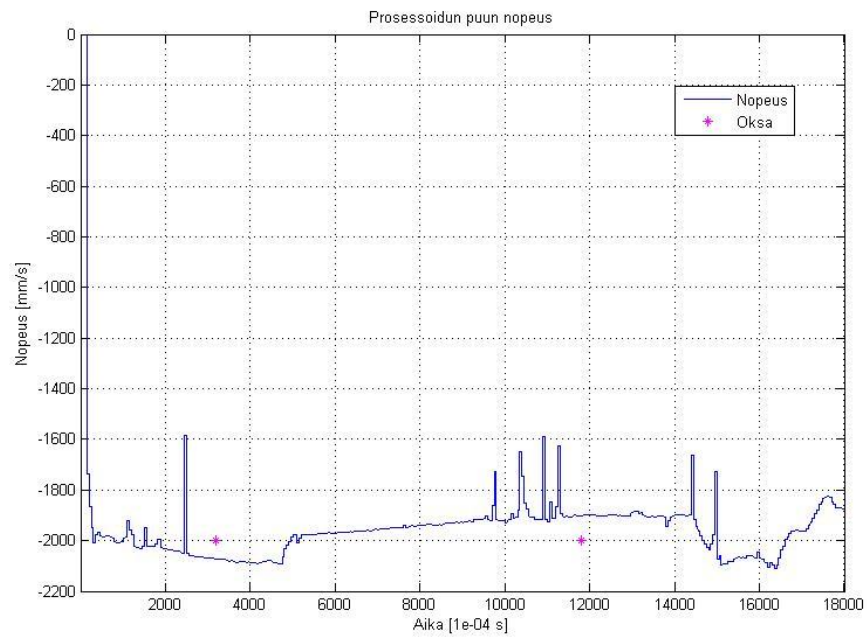
Kuva VI.2. Paine ennen vastusvastaventiiliä



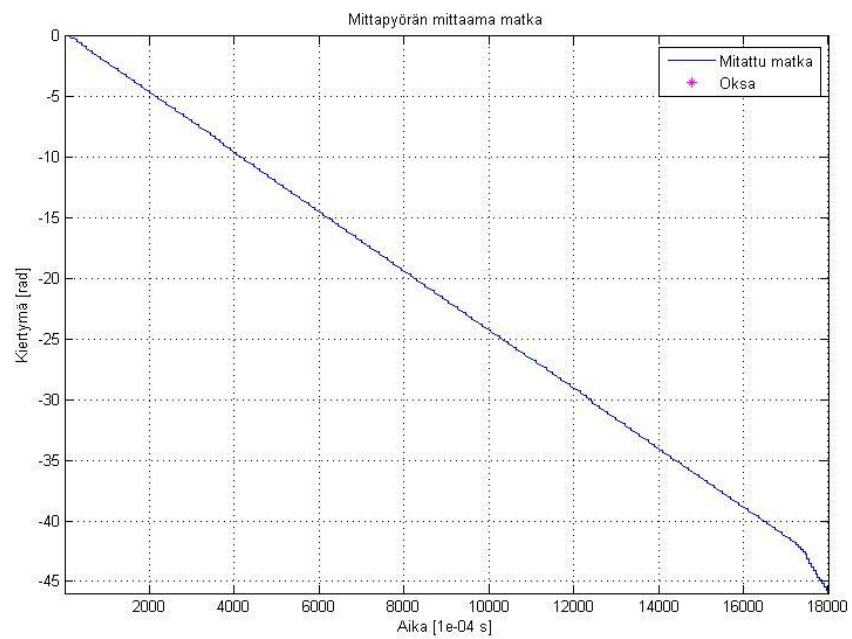
Kuva VI.3. Syöttöpaine ja paine alennuksen jälkeen.



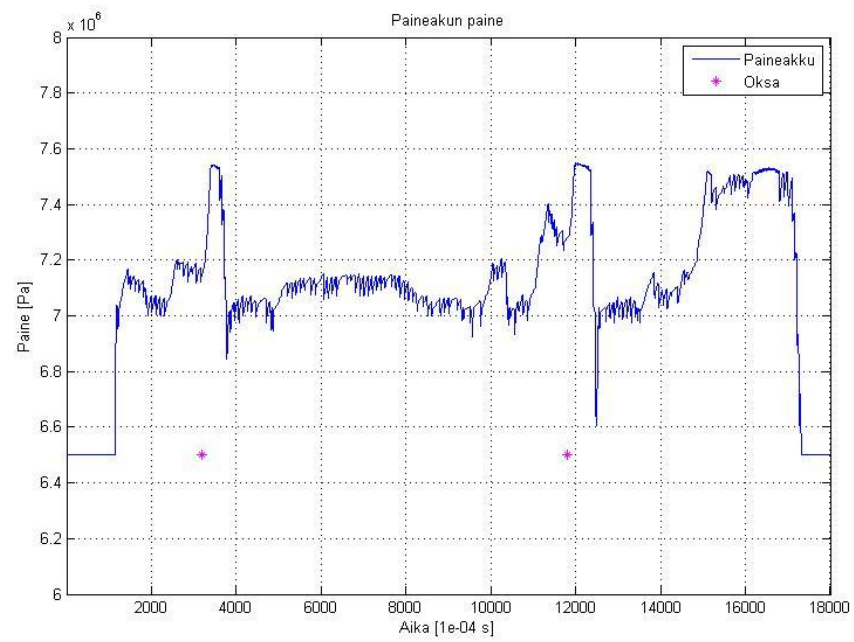
Kuva VI.4. Sylinterin pituus.



Kuva VI.5. Puun nopeus.

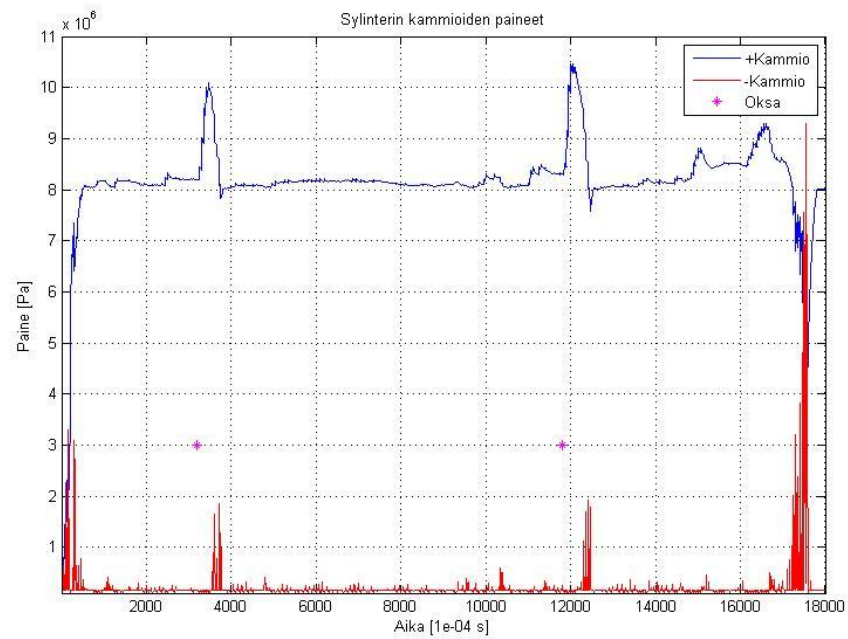


Kuva VI.6. Mittapyörän mittaama matka

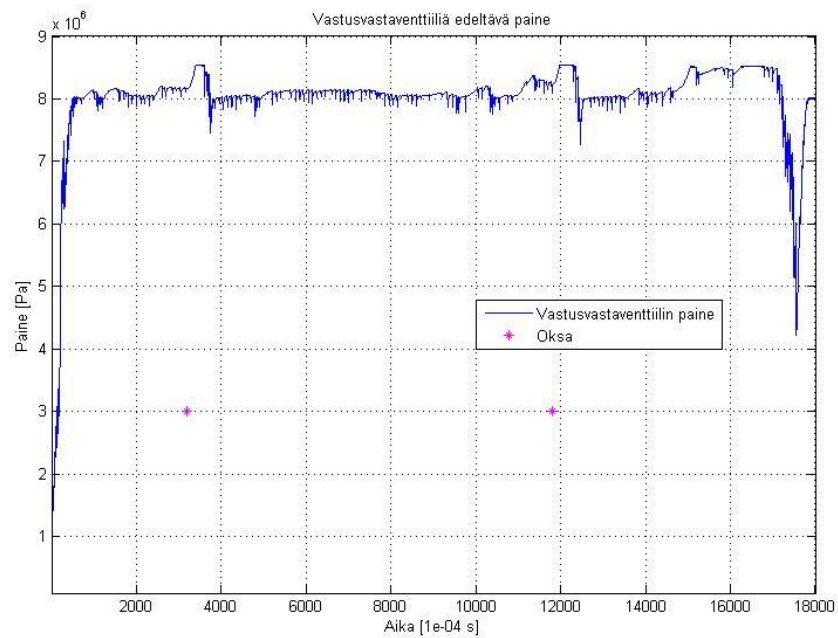


Kuva VI.7. Paineakun paine.

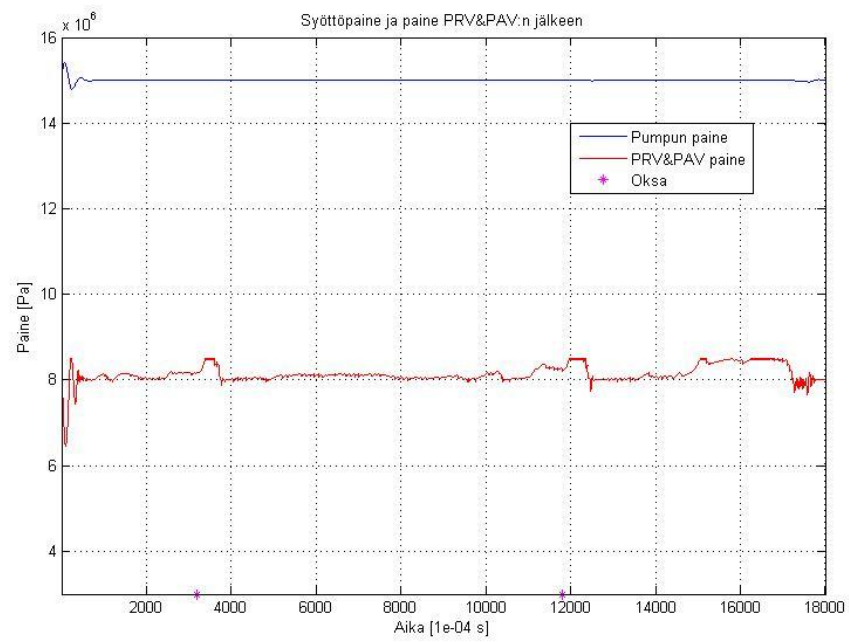
TULOKSET 80 BAR:N PAINATUSPAINEELLA JA PAINAEKULLA



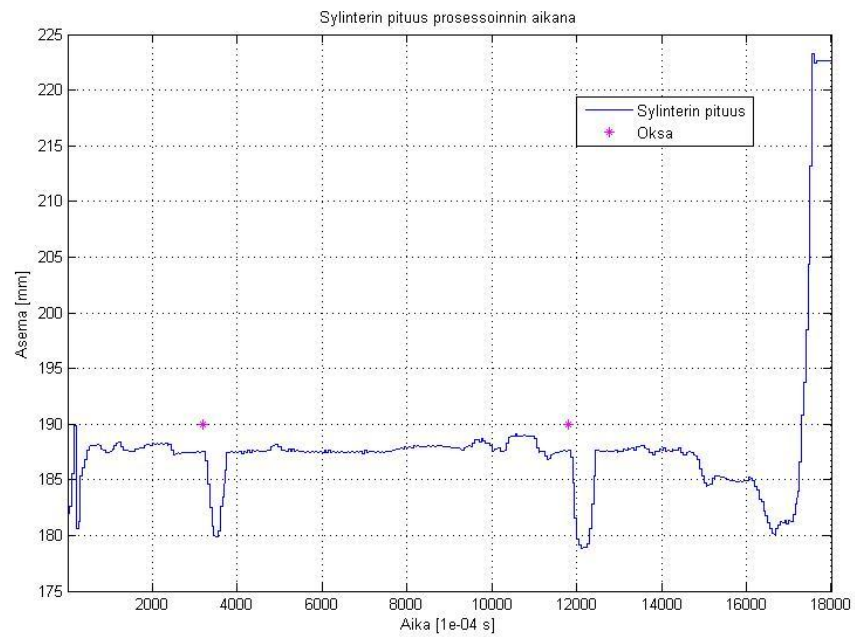
Kuva VII.1. Sylinterin kammioiden paineet.



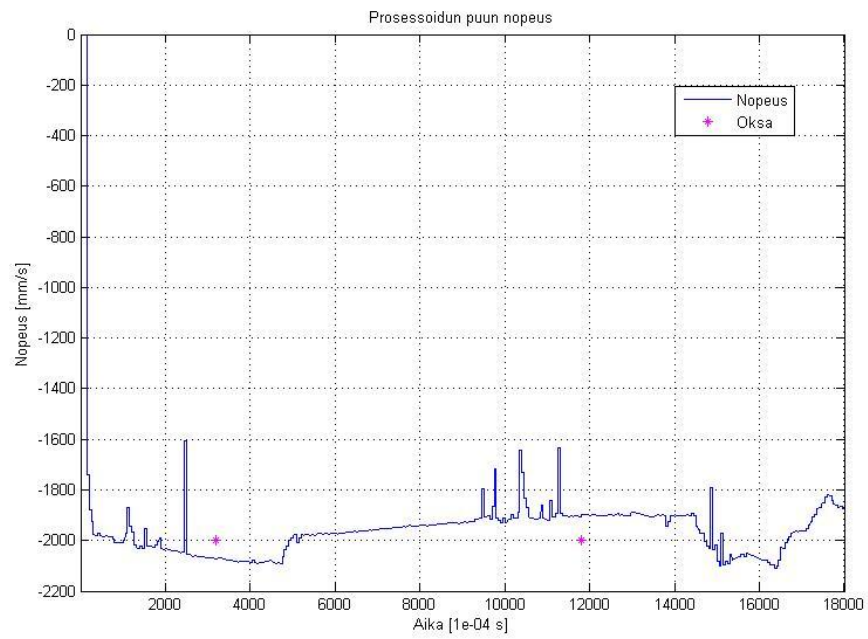
Kuva VII.2. Paine ennen vastusvastaventtiiliä



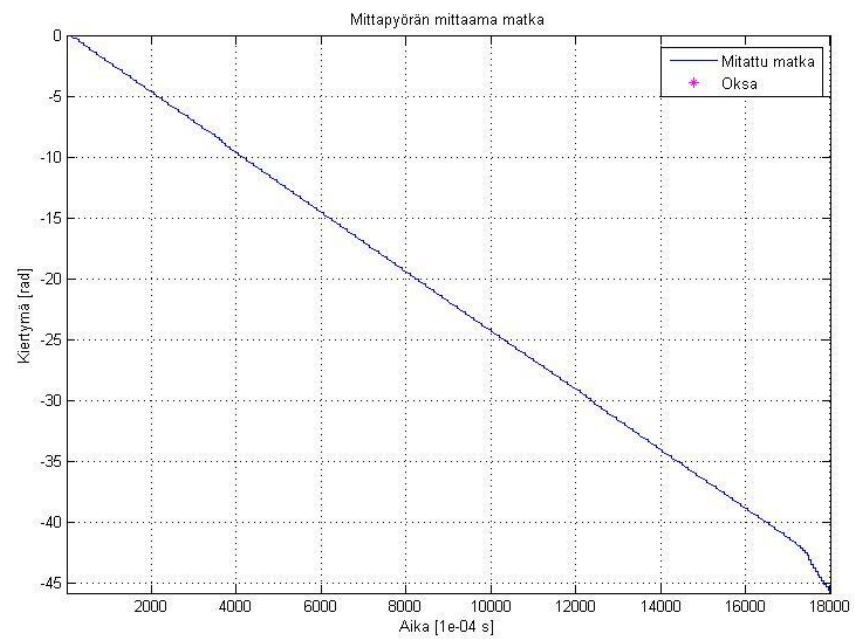
Kuva VII.3. Syöttöpaine ja paine alennuksen jälkeen.



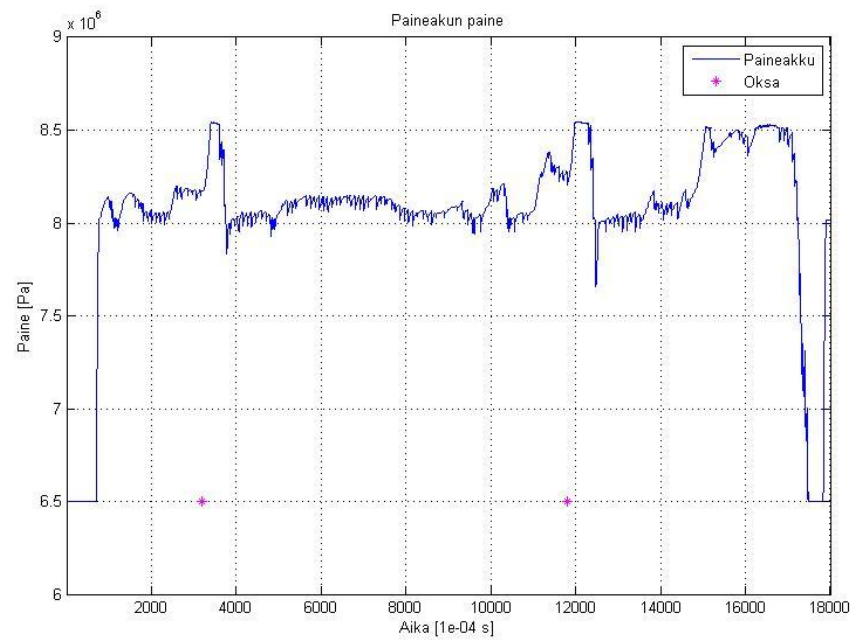
Kuva VII.4. Sylinterin pituus.



Kuva VII.5. Puun nopeus.

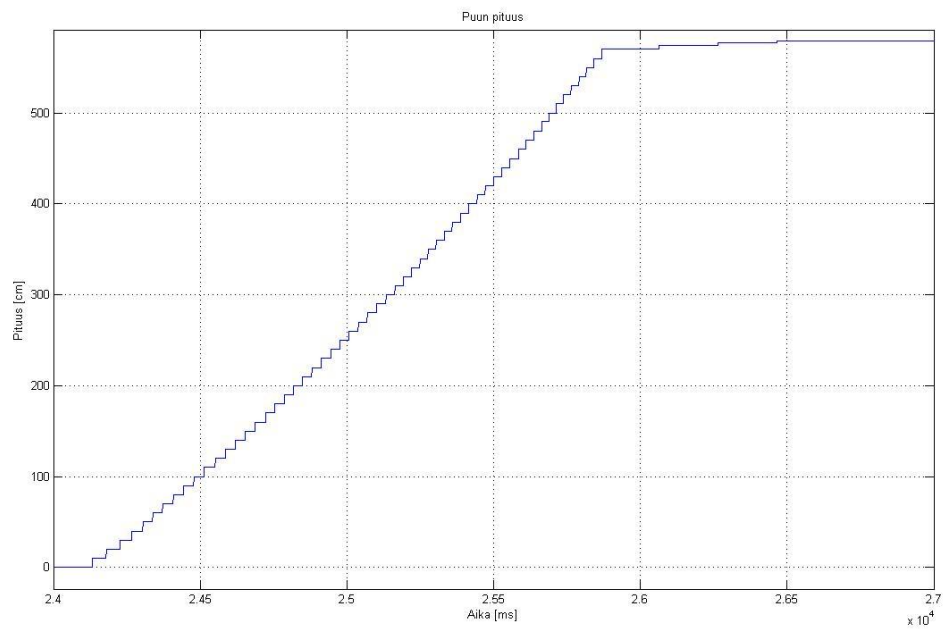


Kuva VII.6. Mittapyörän mittaama matka

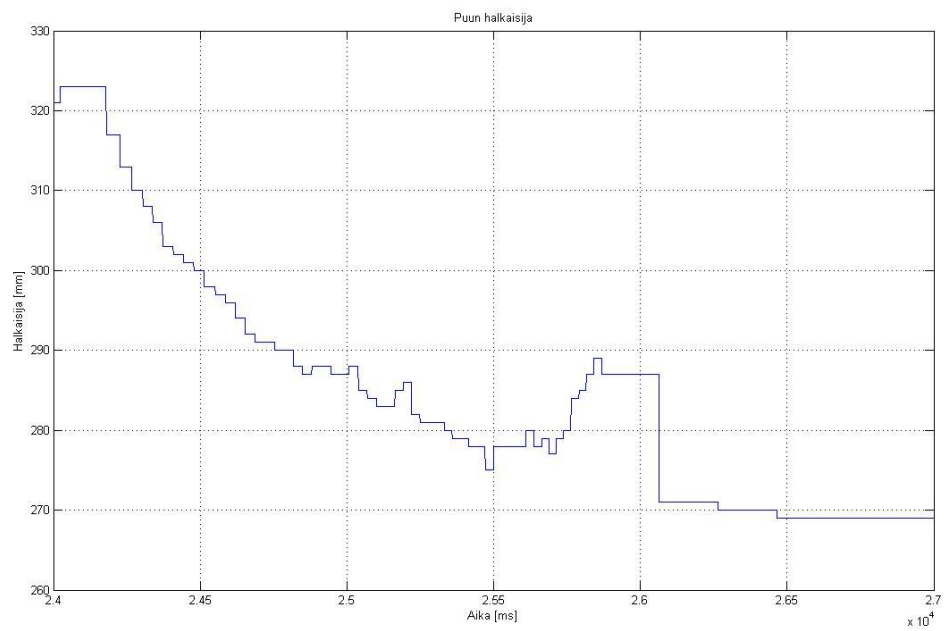


Kuva VII.7. Paineakun paine.

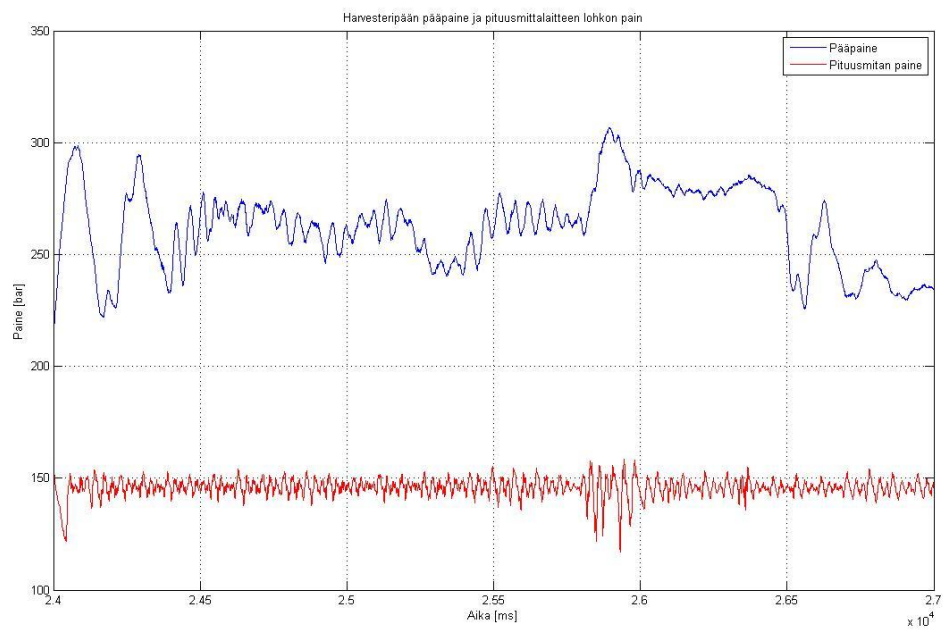
MITTAUSTULOS 70 BAR:N PAINATUSPAINEELLA



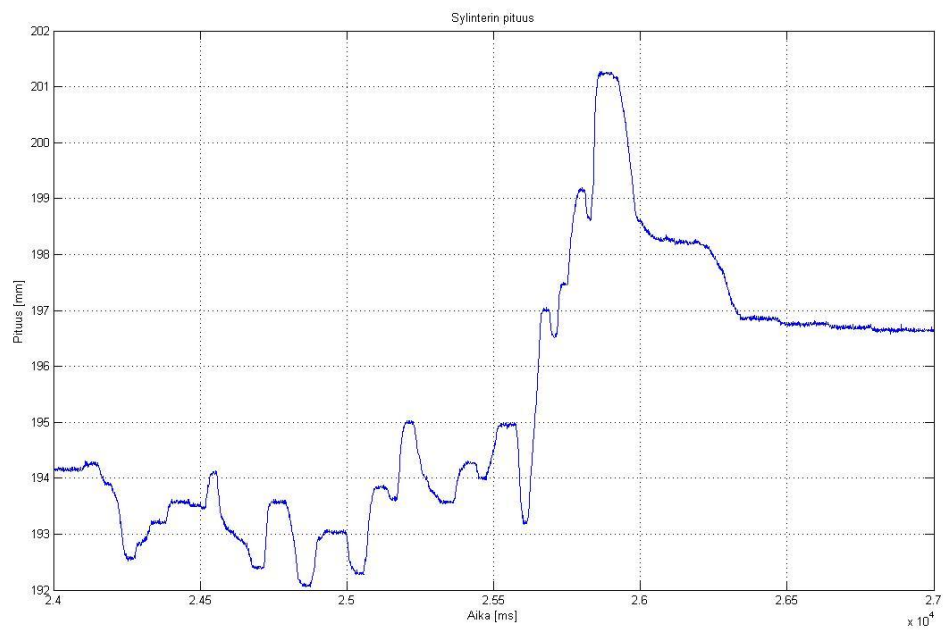
Kuva VIII.1. Puun pituus



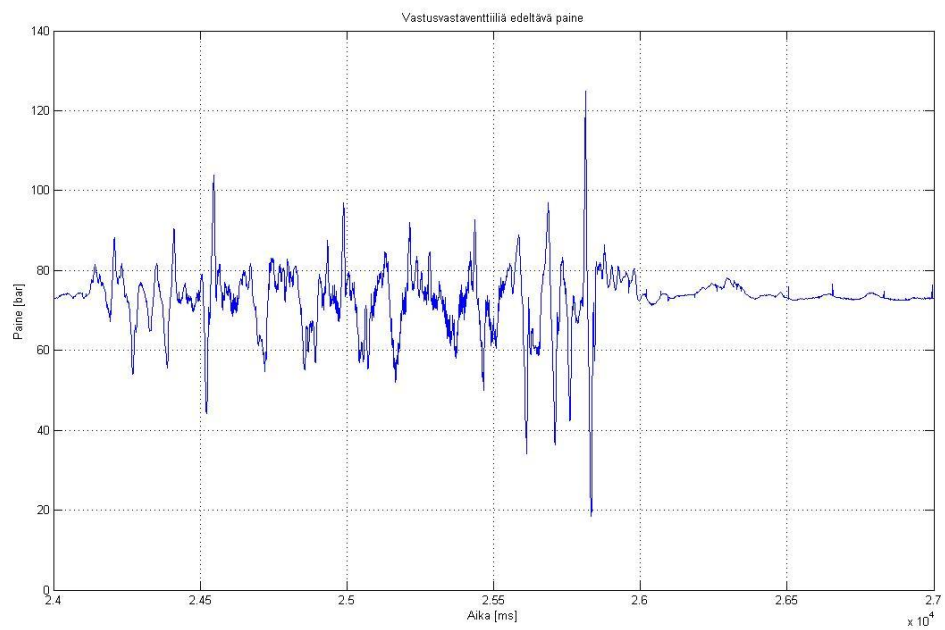
Kuva VIII.2. Puun halkaisija



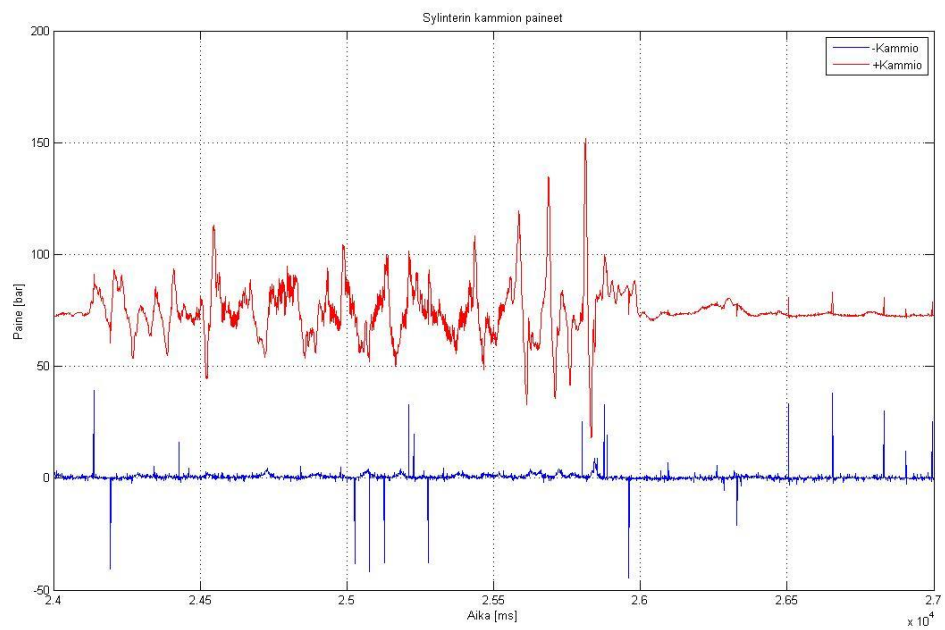
Kuva VIII.3. Harvesteripään pääpaine ja pituusmittalaitteen paine.



Kuva VIII.4. Sylinterin pituus.



Kuva VIII.5. Vastusvastaventtiiliä edeltävä paine.



Kuva VIII.6. Sylinterin kammioden paineet.